

**ARTHUR KOLLING NETO**

**APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA POR  
MEIO DE DADOS ESPACIAIS. ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO  
PARAGUAÇU**

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

Orientador: Fernando Falco Pruski

Coorientadora: Rayssa Balieiro Ribeiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

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

T

Kolling Neto, Arthur, 1993-

K81a  
2021

Aprimoramento da estimativa da disponibilidade hídrica por meio de dados espaciais. Estudo de caso para a bacia do Paraguaçu / Arthur Kolling Neto. – Viçosa, MG, 2021.  
136 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Desenvolvimento de recursos hídricos - Paraguaçu, Rio, Bacia (BA). 2. Medidores de fluxo - Estimativas. 3. Bacias hidrográficas - Manejo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 333.910098142

**ARTHUR KOLLING NETO**

**APRIMORAMENTO DA ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA POR  
MEIO DE DADOS ESPACIAIS. ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO  
PARAGUAÇU**

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

APROVADA: 8 de março de 2021.

Assentimento:



Arthur Kolling Neto  
Autor



Fernando Falco Pruski  
Orientador

*A Deus.*

*À minha família por acreditar no meu potencial.*

*Aos meus pais pelo amor e apoio incondicionais.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de trilhar os melhores caminhos, por ter sustentado meus sonhos e me capacitado para concluir mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, Nório e Mariza Kolling, pela imensa dedicação e apoio, compreensão e esforço incondicional, pelo amor irrestrito e por terem me ensinado valores que permitissem a concretização dos meus objetivos.

À minha irmã Giselly pelo companheirismo em todos os momentos, pelas melhores risadas, carinho e amizade.

À minha avó Maria Flora, da qual tenho orgulho, pelo imenso amor e cuidado em todos os meus dias, bem como as minhas tias Júnia e Rose pelo apreço e carinho durante essa caminhada.

À toda minha família que tem estado ao meu lado, me incentivando a conquistar meus objetivos. Obrigado pelo zelo e pela torcida!

Aos amigos do CRRH: Camila, Fernanda, Isabela, Jéssica, Rafael Petrucelli, Silas, e Tarcila, que me proporcionaram os melhores momentos na UFV, me acolheram de forma especial e foram fundamentais durante esse período.

À minha coorientadora Rayssa pelo esforço, dedicação, paciência, amizade e contribuições fundamentais ao êxito desse trabalho.

Ao meu orientador Fernando Pruski pela oportunidade, apoio e competência depositados neste trabalho.

À banca examinadora Ricardo Amorim, Roberto Filgueiras e Vital Paz pela participação na banca e pelas contribuições ao trabalho.

À UFV, 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.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa conquista, o meu muito obrigado.

## **BIOGRAFIA**

ARTHUR KOLLING NETO, filho de Nório Kolling e Mariza Brasileiro Kolling, nasceu na cidade de Barreiras, BA, no dia 30 de julho de 1993.

Em março de 2012 iniciou o curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), em Barreiras, BA, concluindo-o em julho de 2017.

Em março de 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de mestrado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em março de 2021.

*"Ore como se tudo dependesse de Deus e  
trabalhe se como tudo dependesse de si"*

*Inácio de Loyola*

## RESUMO

KOLLING NETO, Arthur, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Aprimoramento da estimativa da disponibilidade hídrica por meio de dados espaciais. Estudo de caso para a bacia do Paraguaçu.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadora: Rayssa Balieiro Ribeiro.

O conhecimento da disponibilidade hídrica é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, entretanto, principalmente em países em desenvolvimento, a obtenção de dados consistentes por meio dos medidores ao longo da bacia hidrográfica consiste num grande desafio. Nesse contexto, a utilização do sensoriamento remoto conjuntamente com banco de dados espaciais tem sido uma boa alternativa para suprir as deficiências quali-quantitativas das bases de dados, permitindo a agregação de melhorias no processo de regionalização de vazões. Dessa forma, o presente trabalho foi dividido em três 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 balanço hídrico na bacia hidrográfica, o segundo avalia as estimativas das vazões médias geradas a partir das variáveis mais explicativas e o terceiro visa o aprimoramento da regionalização da vazão mínima. No capítulo 1, as variáveis relacionadas à precipitação e evapotranspiração real (ETR), provenientes de metodologias distintas de estimativa, foram combinadas a fim de verificar qual conduz ao balanço hídrico mais representativo para as condições de circulação da água na bacia hidrográfica. Nesse contexto, foi possível constatar que a utilização da precipitação e ETR oriundos do banco de dados TerraClimate (BH<sub>TC\_TC</sub>) apresentou melhor desempenho. No capítulo 2, foi realizado o processo de regionalização para a vazão média de longa duração considerando diferentes variáveis explicativas, a fim de determinar qual estimativa apresentava o comportamento mais representativo, tendo sobressaído a variável BH<sub>TC\_TC</sub>. No capítulo 3, foi avaliada a representatividade das variáveis explicativas para a regionalização das vazões mínimas e concluiu-se que a utilização do BH<sub>TC\_TC</sub> como variável explicativa, conduziu aos melhores resultados. O presente trabalho, no âmbito dos três 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. Vazão média. Vazão mínima. Planejamento e gestão de recursos hídricos.

## ABSTRACT

KOLLING NETO, Arthur, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2021. **Improving the estimate of water availability through spatial data. Case study for the Paraguaçu basin.** Advisor: Fernando Falco Pruski. Co-advisor: Rayssa Balieiro Ribeiro.

Knowledge of water availability is essential for the planning and management of water resources, however, especially in developing countries, obtaining consistent data through meters across the river basin is a major challenge. In this context, the use of remote sensing in conjunction with a spatial database has been a good alternative to address the qualitative and quantitative deficiencies of the databases, allowing the aggregation of improvements in the flow regionalization process. Thus, the present work was divided into three chapters, which are related to the improvement of the flow estimation. The first chapter aims to search for explanatory variables that are more representative of the water balance in the hydrographic basin, the second evaluates the estimates of average flows generated from the most explanatory variables, and the third seeks to improve the regionalization of the minimum flow for the region of the semiarid. In chapter 1, the variables related to precipitation and actual evapotranspiration, derived from different estimation methodologies, were combined in order to verify which leads to the most representative water balance for the conditions of water circulation in the hydrographic basin. In this context, it is possible to verify that the use of precipitation and ETR from the TerraClimate product ( $BH_{TC\_TC}$ ) presented the best performance. In chapter 2, the regionalization process was carried out for the long-term average flow considering different explanatory variables ( $A$ ,  $Peq_{IDW}$ ,  $Peq_{TC}$ ,  $BH_{IDW\_TC}$  and  $BH_{TC\_TC}$ ) in order to determine which estimate presented the most representative behavior, with the  $BH_{TC\_TC}$  variable standing out. In chapter 3, the representativeness of the explanatory variables for the regionalization of minimum flows was evaluated and it was concluded that the use of  $BH_{TC\_TC}$  as an explanatory variable, led to the best results. The present work, within the scope of the three chapters, presents tools for estimating more representative flows over the hydrography, constituting an important support for decision making in the planning and management of water resources.

**Keywords:** Flow regionalization. Average flow. Minimum flow. Planning and management of water resources.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.....	27
Figura 1.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	34
Figura 1.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas da área de estudo. ....	35
Figura 1.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	35
Figura 1.5 - Mapas de precipitação obtidos pelos produtos de sensoriamento remoto GPM (A), TRMM (B), TerraClimate (C) e interpolados por IDW (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada produto. ....	37
Figura 1.6 - Variação altimétrica na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	39
Figura 1.7 - Mapas de evapotranspiração real obtidos pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e MOD16rsp (C) e TerraClimate (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada produto.....	44
Figura 1.8 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do GPM e ETR de diferentes produtos: $ETR_{MOD16}$ (A), $ETR_{MOD16rsp}$ (B), $ETR_{GLEAM}$ (C) e $ETR_{TC}$ (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.....	47
Figura 1.9 - Tipos climáticos existentes na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	49
Figura 1.10 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do TRMM e ETR de diferentes produtos: $ETR_{MOD16}$ (A), $ETR_{MOD16rsp}$ (B), $ETR_{GLEAM}$ (C) e $ETR_{TC}$ (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.....	50
Figura 1.11 - Balanço hídrico obtido com a precipitação do IDW e a ETR de diferentes produtos: $ETR_{MOD16}$ (A), $ETR_{MOD16rsp}$ (B), $ETR_{GLEAM}$ (C) e $ETR_{TC}$ (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.....	52
Figura 1.12 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do TerraClimate e ETR de diferentes produtos: $ETR_{MOD16}$ (A), $ETR_{MOD16rsp}$ (B), $ETR_{GLEAM}$ (C) e $ETR_{TC}$ (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico. ....	53

Figura 2.1 - Fluxograma das etapas da regionalização da vazão média.....	67
Figura 2.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	79
Figura 2.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	80
Figura 2.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	80
Figura 2.5 - Classificação dos rios ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	81
Figura 2.6 - Mapas de precipitação obtidos pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B) para bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	82
Figura 2.7 - Mapa de ETR oriunda do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	82
Figura 2.8 - Balanço hídrico oriundos da combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	83
Figura 2.9 - Boxplot do A) $CE_{IDW}$ e B) $CE_{TC}$ para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	84
Figura 2.10 - Agrupamento das estações fluviométricas considerando uma região (A) duas regiões (B) e três regiões (C) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	85
Figura 2.11 - Representação da variação do CE ao longo da hidrografia (escala 1:100.000) utilizando as variáveis: A (A), $Peq_{IDW}$ (B), $Peq_{TC}$ (C), $BH_{IDW\_TC}$ (D) e $BH_{TC\_TC}$ (E)...	89
Figura 2.12 - Representação da variação do CE ao longo da hidrografia (escala 1:1.000.000) utilizando as variáveis: A (A), $Peq_{IDW}$ (B), $Peq_{TC}$ (C), $BH_{IDW\_TC}$ (D) e $BH_{TC\_TC}$ (E)...	92
Figura 2.13 - Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu conforme o risco associado aos valores estimados, considerando as variáveis independentes: A (A), $Peq_{IDW}$ (B), $Peq_{TC}$ (C), $BH_{IDW\_TC}$ (D) e $BH_{TC\_TC}$ (E). ....	94
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da regionalização da vazão mínima.....	104
Figura 3.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	115
Figura 3.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas da área de estudo. ....	116
Figura 3.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	116
Figura 3.5 - Mapas de precipitação oriundo dos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	117

Figura 3.6 – Mapa de ETR oriundo do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. ....	117
Figura 3.7 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real $ETR_{TC}$ para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	118
Figura 3.8 - Boxplot da vazão específica ( $q_{90}$ ) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. .	119
Figura 3.9 - Agrupamento das estações fluviométricas considerando duas RHH, para a vazão mínima ( $Q_{90}$ ). ....	120
Figura 3.10 - Mapas de precipitação na RHH 1 oriundos de dados interpolados por IDW (A) e do banco de dados TerraClimate (B). ....	121
Figura 3.11 - Mapa de ETR obtida do banco de dados TerraClimate para a RHH 1. ....	121
Figura 3.12 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real do banco de dados $ETR_{TC}$ para a RHH 1. ....	122
Figura 3.13 - Representação da variação da vazão específica ( $q_{90}$ ) ao longo da hidrografia, utilizando as variáveis: A (A) $Peq_{IDW}$ (B), $Peq_{TC}$ (C), $BH_{IDW\_TC}$ (D) e $BH_{TC\_TC}$ (E).	124
Figura 3.14 - Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu conforme o risco associado aos valores da vazão específica ( $q_{90}$ ) considerando as variáveis independentes A (A), $Peq_{IDW}$ (B), $Peq_{TC}$ (C), $BH_{IDW\_TC}$ (D) e $BH_{TC\_TC}$ (E). ....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Índices estatísticos calculados para comparação dos dados de precipitação.....	41
Tabela 2.1 - Intervalos utilizados para a análise de frequência das vazões regionalizadas.....	77
Tabela 2.2 - ID, Código, Área de drenagem, $Q_{mld}$ , $CE_{IDW}$ e $CE_{TC}$ para as estações fluviométricas consideradas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	83
Tabela 2.3 - Equações de regionalização da vazão para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e suas respectivas significâncias (p-valor) .....	86
Tabela 2.4 - Índices estatísticos do modelo de regionalização de vazões da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, considerando diferentes variáveis independentes.....	87
Tabela 3.1 - Intervalos utilizados para análise de risco das vazões regionalizadas.....	113
Tabela 3.2 - Código, área, $Q_{90}$ , e $q_{90}$ para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu .....	118
Tabela 3.3 - Equações de regionalização de vazões para a RHH 1 da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.....	122
Tabela 3.4 - Índices estatísticos do modelo de regionalização vazões da RHH1, considerando diferentes variáveis independentes .....	123

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BH	Balanço hídrico (mm)
BH <sub>GPM_MOD16</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>GPM</sub> e ETR <sub>MOD16</sub>
BH <sub>GPM_MOD16rsp</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>GPM</sub> e ETR <sub>MOD16rsp</sub>
BH <sub>GPM_GLEAM</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>GPM</sub> e ETR <sub>GLEAM</sub>
BH <sub>GPM_TC</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>GPM</sub> e ETR <sub>TC</sub>
BH <sub>IDW_MOD16</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>IDW</sub> e ETR <sub>MOD16</sub>
BH <sub>IDW_MOD16rsp</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>IDW</sub> e ETR <sub>MOD16rsp</sub>
BH <sub>IDW_GLEAM</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>IDW</sub> e ETR <sub>GLEAM</sub>
BH <sub>IDW_TC</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>IDW</sub> e ETR <sub>TC</sub>
BH <sub>max</sub>	Balanço Hídrico máximo (mm)
BH <sub>min</sub>	Balanço Hídrico mínimo (mm)
BH <sub>TC_MOD16</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TC</sub> e ETR <sub>MOD16</sub>
BH <sub>TC_MOD16rsp</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TC</sub> e ETR <sub>MOD16rsp</sub>
BH <sub>TC_GLEAM</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TC</sub> e ETR <sub>GLEAM</sub>
BH <sub>TC_TC</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TC</sub> e ETR <sub>TC</sub>
BH <sub>TRMM_MOD16</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TRMM</sub> e ETR <sub>MOD16</sub>
BH <sub>TRMM_MOD16rsp</sub>	Balanço hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TRMM</sub> e ETR <sub>MOD16rsp</sub>

BH <sub>TRMM_GLEAM</sub>	Balanco hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TRMM</sub> e ETR <sub>GLEAM</sub>
BH <sub>TRMM_TC</sub>	Balanco hídrico (mm) obtido com combinação entre a PPT <sub>TC</sub> e ETR <sub>TC</sub>
CE <sub>IDW</sub>	Coefficiente de escoamento com precipitação obtida pelo método IDW
CE <sub>TC</sub>	Coefficiente de escoamento com precipitação do produto TerraClimate
ETR	Evapotranspiração real (mm)
ETR <sub>GLEAM</sub>	Evapotranspiração real do produto GLEAM (mm)
ETR <sub>MOD16</sub>	Evapotranspiração real do produto MOD16 (mm)
ETR <sub>MOD16rsp</sub>	Evapotranspiração real do produto MOD16 compatibilizada com o produto GLEAM (mm)
ETR <sub>max</sub>	Evapotranspiração real máxima (mm)
ETR <sub>min</sub>	Evapotranspiração real mínima (mm)
ETR <sub>TC</sub>	Evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate (mm)
GLEAM	<i>Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology</i>
IC	Intervalo de confiança
ID	Identificação
IDW	Inverso da potência das distâncias ( <i>Inverse distance weighting</i> )
MAE	Erro médio absoluto
mNSE	Índice de eficiência de Nash Sutcliffe modificado
NSE	Índice de eficiência de Nash Sutcliffe
PBIAS	Percentual de tendência
Peq	Vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem considerada (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
PPT <sub>GPM</sub>	Precipitação oriunda do produto GPM (mm)
PPT <sub>IDW</sub>	Precipitação oriunda da interpolação por IDW (mm)
PPT <sub>TC</sub>	Precipitação oriunda do banco de dados TerraClimate (mm)
PPT <sub>TRMM</sub>	Precipitação oriunda do produto TRMM (mm)
Q <sub>90</sub>	Vazão mínima associada à permanência de 90% no tempo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
q <sub>90</sub>	Vazão específica (L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )
q <sub>min</sub>	Vazão mínima

$Q_{mld}$	Vazão média de longa duração ( $m^3s^{-1}$ )
$R^2_{ajust}$	Coefficiente de determinação ajustado
RHH	Região hidrologicamente homogênea
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
$Se$	Erro padrão

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	19
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	21
<b>1 CAPÍTULO 1 – Representatividade do balanço hídrico por meio de diferentes fontes de precipitação e evapotranspiração real</b> .....	24
<b>RESUMO</b> .....	24
1.1 INTRODUÇÃO .....	25
1.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	26
1.2.1 Base de dados .....	27
1.2.2 Precipitação .....	27
1.2.2.1 Dados de estações pluviométricas .....	28
1.2.2.2 Precipitação - TerraClimate .....	28
1.2.2.3 Precipitação - TRMM .....	29
1.2.2.4 Precipitação - GPM.....	29
1.2.2.5 Avaliação dos valores da precipitação .....	29
1.2.3 Evapotranspiração real .....	30
1.2.3.1 Imagens do MOD16.....	31
1.2.3.2 Imagens do GLEAM.....	31
1.2.3.3 Imagens do TerraClimate.....	32
1.2.4 Balanço Hídrico.....	32
1.2.5 Estudo de caso .....	33
1.2.5.1 Caracterização da área de estudo .....	33
1.2.5.2 Seleção dos dados .....	34
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
1.3.1 Precipitação .....	36
1.3.2 Evapotranspiração real .....	43
1.3.3 Balanço Hídrico.....	46
1.4 CONCLUSÃO .....	55
1.5 REFERÊNCIAS.....	56
<b>2 CAPÍTULO 2 – Aprimoramento do método de regionalização da vazão média de longa duração com a utilização de dados espaciais</b> .....	63
<b>RESUMO</b> .....	63

2.1	INTRODUÇÃO .....	64
2.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	66
2.2.1	Regionalização de vazões .....	66
2.2.2	Base de dados .....	67
2.2.3	Variáveis independentes .....	68
2.2.3.1	Área de drenagem .....	69
2.2.3.2	Precipitação .....	69
2.2.3.3	Evapotranspiração real .....	69
2.2.3.4	Balanco Hídrico .....	69
2.2.4	Variáveis dependentes .....	70
2.2.4.1	Identificação de outliers – Boxplot .....	70
2.2.4.2	Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas .....	71
2.2.4.3	Avaliação dos agrupamentos .....	73
2.2.4.4	Obtenção dos modelos de regionalização de vazão .....	73
2.2.5	Análise de desempenho .....	74
2.2.5.1	Análise estatística .....	74
2.2.5.2	Análise física .....	76
2.2.5.3	Análise de risco .....	76
2.2.6	Estudo de caso .....	77
2.2.6.1	Caracterização da área de estudo .....	78
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	83
2.3.1	Variáveis dependentes .....	83
2.3.2	Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas .....	85
2.3.3	Equações de regionalização .....	86
2.3.4	Análise de desempenho .....	86
2.3.4.1	Análise estatística .....	86
2.3.4.2	Análise física .....	88
2.3.4.3	Análise de risco .....	93
2.4	CONCLUSÃO .....	96
2.5	REFERÊNCIAS .....	96
3	<b>CAPÍTULO 3 – Aprimoramento do método de regionalização de vazões mínimas com a utilização de dados espaciais .....</b>	<b>101</b>
	RESUMO .....	101
3.1	INTRODUÇÃO .....	102

3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	103
3.2.1	Regionalização de vazões .....	103
3.2.2	Base de dados .....	104
3.2.3	Variáveis independentes .....	105
3.2.3.1	Área de drenagem .....	106
3.2.3.2	Precipitação .....	106
3.2.3.3	Evapotranspiração real .....	106
3.2.3.4	Balanço Hídrico .....	106
3.2.4	Variáveis dependentes .....	107
3.2.4.1	Identificação de outliers – Boxplot .....	107
3.2.4.2	Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas .....	108
3.2.4.3	Avaliação dos agrupamentos .....	109
3.2.5	Obtenção dos modelos de regionalização de vazão .....	110
3.2.6	Análise de desempenho .....	110
3.2.6.1	Análise estatística .....	110
3.2.6.2	Análise física .....	112
3.2.6.3	Análise de risco .....	113
3.2.7	Estudo de caso .....	114
3.2.7.1	Caracterização da área de estudo .....	114
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	118
3.3.1	Variáveis dependentes .....	118
3.3.2	Boxplot .....	119
3.3.3	Identificação das regiões homogêneas .....	119
3.3.4	Equações de regionalização .....	122
3.3.5	Análise de desempenho .....	122
3.3.5.1	Análise estatística .....	123
3.3.5.2	Análise física .....	124
3.3.5.3	Análise de risco .....	126
3.4	CONCLUSÃO .....	128
3.5	REFERÊNCIAS .....	128
	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>134</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural que possui papel singular no desenvolvimento da sociedade e está arraigada ao processo de existência e evolução das atividades humanas (TUNDISI, 2003; CORDEIRO NETTO e TUCCI, 2003; SETTI et al., 2000). Contudo, o intenso desenvolvimento econômico e social, o crescimento populacional acelerado, o estilo de vida consumista, as mudanças climáticas (CAO et al., 2018; WANG et al., 2019), associados às condições de desigualdade da distribuição de água no mundo (KUMMU et al., 2010; SEEKELL, 2011) têm provocado o aumento de cenários de escassez hídrica.

Entender o comportamento do ciclo hidrológico e as particularidades inerentes às diferentes regiões são fundamentais para a gestão e planejamento eficientes dos recursos hídricos (AQUINO et al., 2005; PORTO e PORTO, 2008), principalmente na atenuação dos conflitos pelo uso da água e no auxílio aos órgãos gestores nas tomadas de decisão (REGO, 2013). Diante disso, o conhecimento da disponibilidade hídrica se torna indispensável, principalmente no que refere à adoção de medidas efetivas para otimização e gerenciamento dos recursos hídricos (SILVA et al., 2015; PRUSKI e PRUSKI, 2011; ZAMOUM e SOUAG-GAMANE, 2019).

A disponibilidade dos recursos hídricos é definida pelas vazões mínimas e médias (NOVAES et al., 2009). A vazão mínima representa a disponibilidade hídrica natural (SMAKTHIN, 2001) e a vazão média de longa duração representa a disponibilidade hídrica potencial de uma bacia hidrográfica, sendo a máxima vazão que pode ser regularizada, desconsiderando as perdas por evaporação e infiltração (PRUSKI e PRUSKI, 2011).

A estimativa da disponibilidade hídrica em seções de interesse é realizada por meio da obtenção de dados históricos de vazão advindos de estações fluviométricas. Contudo, estes dados nem sempre estão disponíveis para os locais desejados, ou possuem séries de dados com qualidade ou quantidade necessária para inferências estatísticas, e, portanto, não são capazes de representar efetivamente as condições da área de drenagem (PANDEY e NGUYEN, 1999).

No Brasil, além da quantidade insuficiente de estações fluviométricas, frequentemente, as séries históricas de dados possuem curta extensão (BESKOW, 2014). Essa deficiência de dados fluviométricos produz grandes incertezas na quantificação de vazões (PAVELSKY et al., 2014; CRUZ, 2005; SILVEIRA e TUCCI, 1998).

Nesse contexto, tendo por objetivo obter informações hidrológicas de locais com dados insuficientes ou inexistentes, uma prática amplamente difundida e utilizada é a regionalização

de vazões, que se baseia na transferência de dados hidrológicos entre regiões com características físicas e climáticas semelhantes (PRUSKI et al., 2012; GASQUES et al., 2018). Dentre as técnicas de regionalização, a abordagem baseada em regressão é a mais empregada, utilizando a transferência de equações e parâmetros relacionados com as estatísticas, entre a variável hidrológica analisada e as características físicas e climáticas da bacia (LAMB e KAY, 2004; MERZ et al., 2006; WILKERSON et al., 2013; MEDIERO e KJELDTSEN, 2014).

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 (RIBEIRO, 2020). Nesse sentido, Merz et al., (2006) e Pruski et al., (2013) salientam a importância do uso de variáveis mais representativas no processo de formação de vazão para melhorar as estimativas da regionalização.

Para suprir a carência de dados atribuída às estimativas espaço-temporais de variáveis hidrológicas, as observações de sensoriamento remoto e bancos de dados espaciais são alternativas promissoras e permitem a obtenção de estimativas como precipitação, evapotranspiração e mudanças no armazenamento de água terrestre (FISHER et al., 2017). O uso do sensoriamento remoto na hidrologia representa um importante avanço na compreensão científica de processos e variáveis hidrológicas, pois as abordagens dos estudos passaram de uma escala experimental para uma escala regional a global (LETTENMAIER et al., 2015).

Considerando a importância da estimativa das vazões, o presente trabalho apresenta três abordagens relacionadas ao aprimoramento da estimativa da disponibilidade hídrica ao longo da bacia hidrográfica. A primeira é focada na combinação de variáveis obtidas por diferentes metodologias para a melhor representação dos processos físicos de circulação na bacia hidrográfica, a segunda está relacionada com a busca por modelos de regionalização de vazões que utilizem variáveis explicativas mais representativas do processo de formação de vazões médias e que possibilitem melhoria das estimativas e a terceira traz a abordagem da melhoria da representatividade do processo de estimativas das vazões mínimas numa bacia hidrográfica do semiárido brasileiro.

## REFERÊNCIAS

- AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, p. 29-41, 2005.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; FARIA, L. C.; SIMÕES, M. C.; CALDEIRA, T. L.; NUNES, G. S. Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 748-754, 2014.
- 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, 2018.
- CORDEIRO NETTO, O. de M.; TUCCI, C. E. M. Os desafios em ciência, tecnologia & inovação: resultados alcançados com o fundo setorial de recursos hídricos. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 44-46, 2003.
- CRUZ, R. C. Prescrição de vazão ecológica: aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados, 2005.
- FISHER, J. B.; MELTON, F.; MIDDLETON, E.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; ALLEN, R.; KILIC, A. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, v.53, n. 4, p. 2618-2626, 2017.
- GASQUES, A. C. F.; NEVES, G. L.; SANTOS, J. D.; MAUAD, F. F.; OKAWA, C. M. P. Regionalização de vazões mínimas: Breve revisão Teórica. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 60-70, 2018.
- 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, 2010.
- LAMB, R.; KAY, A. L. Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. **Water Resources Research**, v. 40, p. 1–13, 2004.
- LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; HUFFMAN, G. J.; PAN, M.; WOOD, E. F. (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 7309-7342, 2015.
- MEDIERO, L.; KJELDSSEN, T. R. Regional flood hydrology in a semi-arid catchment using a GLS regression model. **Journal of Hydrology**, v. 514, p. 158–171, 2014.
- MERZ, R.; BLÖSCHL, G.; PARAJKA, J. Regionalization methods in rainfall–runoff modelling using large catchment samples. **IAHS publication**, v. 307, p. 117, 2006.
- NOVAES, L. F.; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O. D.; RODRIGUEZ, R. D. G.; SILVA, D. 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.
- 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, 1999.
- PAVELSKY, T. M.; DURAND, M. T.; ANDREADIS, K.; BEIGHLEY, R. E.; PAIVA, R. C. D.; ALLEN, G. H.; MILLER Z. F. Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1516-1525, 2014.
- PORTO, M. F. A; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S.; de SOUZA, M. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2012.
- 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, 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. da S. (ed.), Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande: INSA, 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, 2013.
- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. Dissertação de Mestrado, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.
- RIBEIRO, R. B. **Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica**/ Tese de Doutorado – Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.
- 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, 2011.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. D. M.; PEREIRA, I. D. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos, 2ª ed. – Brasília: **Agência Nacional de Energia Elétrica**, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.
- SILVA, B. M. B. da; SILVA, D. D. da; MOREIRA, M. C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 623-634, 2015.
- SILVEIRA, G. L. da; TUCCI, C. E. M; SILVEIRA, A. L. L da. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados, 1998.
- SMAKTHIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, 240. p.147-186, 2001.
- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

- WAGENER, T.; WHEATER, H. S.; GUPTA, H. V. **Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments**. London: PImperial College Press, 2004.
- 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, 2013.
- WILKERSON, J.; MERWADE, V. Incorporating surface storage and slope to estimate clark unit hydrographs for ungauged Indiana watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 11, p. 918-930, 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, 2019.

## **1 CAPÍTULO 1 – Representatividade do balanço hídrico por meio de diferentes fontes de precipitação e evapotranspiração real**

### **RESUMO**

A compreensão dos processos relacionados à circulação da água na bacia hidrográfica é fundamental para o desenvolvimento de estudos hidrológicos, estimativas da disponibilidade hídrica e melhorias na gestão e planejamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do balanço hídrico (BH), proveniente da combinação da precipitação (PPT) e evapotranspiração real (ETR) de diferentes metodologias quanto à representatividade das condições físicas e climáticas da bacia hidrográfica. Para isso, foram consideradas quatro fontes de dados de precipitação (GPM, TRMM, TerraClimate e interpolação por IDW dos dados de estações pluviométricas) e quatro de evapotranspiração real (MOD16, GLEAM, MOD16\_GLEAM e TerraClimate) para estimativa dos balanços hídricos na bacia do rio Paraguaçu. Os produtos de precipitação foram analisados por meio de análise estatística e física e os produtos de ETR foram avaliados conforme a distribuição espacial e magnitude dos valores ao longo da bacia. Por fim, a avaliação do balanço hídrico foi realizada considerando a sua representatividade ao longo da bacia, frente aos aspectos de relevo e edafoclimáticos. Os resultados indicaram que as variáveis ( $PPT_{TC}$  e  $ETR_{TC}$ ), provenientes da base de dados TerraClimate, caracterizaram melhor as variações da magnitude e da distribuição espacial dos valores de cada região, como também o efeito orográfico e o semiárido e, além disso, produziram a melhor combinação do balanço hídrico ( $BH_{TC\_TC}$ ), sem a ocorrência de valores negativos. Portanto, o  $BH_{TC\_TC}$  foi a variável mais representativa das condições de circulação da água na bacia hidrográfica.

## 1.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos (EDUARDO et al., 2016). Portanto, deve abarcar os processos hidrológicos juntamente com suas particularidades e subsidiar o entendimento acerca do balanço hídrico e, principalmente, das variáveis de precipitação e evapotranspiração (AQUINO et al., 2005).

A precipitação e a evapotranspiração são as principais componentes do ciclo hidrológico (HUFFMAN et al., 1997), caracterizam a entrada e saída de água e determinam a disponibilidade hídrica no planeta (LONG et al., 2014). Nesse sentido, a obtenção de estimativas confiáveis dessas variáveis agrega maior robustez aos resultados de estudos hidrológicos e são de suma importância para garantir melhor representação do balanço hídrico na bacia hidrográfica (RIBEIRO, 2020).

A análise do balanço hídrico no ciclo hidrológico é essencial para a representatividade dos recursos hídricos em diferentes regiões do mundo (MOHEBZADEH e FALLAH, 2019), possibilitando a avaliação da variação da quantidade de água armazenada (superficial e subterrânea) e dos respectivos processos hidrológicos (precipitação, escoamento e evapotranspiração) ao longo do tempo (FILL et al., 2005). O balanço hídrico constitui-se uma ferramenta valiosa para estimar corretamente a disponibilidade hídrica, permitindo a caracterização da variabilidade espacial e temporal do regime hidrológico (UNESCO, 1982).

Estimativas de precipitação e evapotranspiração em grandes escalas espaciais ainda são desafiadoras devido à alta heterogeneidade das características da superfície da Terra (ROUHOLAHNEJAD FREUND et al., 2020), e afetam, principalmente, a evapotranspiração, que depende da disponibilidade de água, topografia, cobertura vegetal, propriedades do solo, e a variabilidade do clima (GASH, 1987; FRIEDL, 1996; JANOWIAK et al. 1998). Somado a isso, a baixa densidade de medidores dessas variáveis dificulta o seu monitoramento espaço-temporal, pode causar grande incerteza em regiões mais remotas e constitui um obstáculo para muitos estudos hidrológicos (FISHER et al., 2017; LELIS et al., 2018).

O sensoriamento remoto se tornou uma alternativa importante para suprir as limitações encontradas na aquisição de dados (SKOFRONICK-JACKSON et al., 2017; ZHANG et al., 2018; MOREIRA et al., 2019a). Esses sensores são capazes de realizar medições diretas e indiretas de quase todos os componentes do ciclo hidrológico, com diferentes resoluções espaciais e temporais e, além disso, capazes de fornecer informações para o gerenciamento dos recursos hídricos e monitoramento da evolução dos perigos e seus impactos (VAN DIJK e

RENZULLO, 2011; LETTENMAIER et al., 2015; MCCABE et al., 2017). Apesar disso, para o melhor aproveitamento da informação gerada é necessário que os dados obtidos sejam avaliados (SIRISENA et al., 2020).

A avaliação de dados de sensoriamento remoto, ou dados espaciais, como alternativa aos hidrológicos ainda pode apresentar muitos desafios, como a escolha do melhor banco de dados de variáveis estimadas em regiões com características marcantes, como regiões úmidas (MOREIRA et al., 2019b) ou semiáridas (RIBEIRO, 2020). As missões de satélite fornecem uma maneira promissora e econômica de estimar os componentes individuais do ciclo hidrológico, no entanto, quando combinados, eles não fecham o balanço hídrico devido as incertezas nos conjuntos de dados hidrológicos (ZHANG et al., 2018).

Sheffield et al., (2009) descobriram que a alta polarização na precipitação por satélite foi o principal fator do não fechamento do balanço hídrico na bacia do rio Mississippi, nos Estados Unidos da América (EUA). Gao et al., (2010) também concluíram que o fechamento do balanço hídrico em 13 grandes rios continentais nos EUA não foi obtido principalmente devido aos vieses na precipitação e evapotranspiração. E Moreira et al., (2019b) verificaram que as grandes incertezas nas estimativas das variáveis precipitação e evapotranspiração e a baixa disponibilidade de dados medidos contribuíram para o não fechamento do balanço hídrico na região do pantanal brasileiro.

O fechamento do balanço hídrico ainda constitui um desafio e o refinamento das informações sobre a variação das suas componentes tem sido uma alternativa para obtenção de melhores estimativas (MOREIRA et al., 2019b). Considerando que as informações provenientes de sensoriamento remoto e bancos de dados espaciais podem gerar variáveis hidrológicas mais representativas, a análise desses produtos é de suma importância. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do balanço hídrico proveniente da combinação da precipitação e da evapotranspiração real, oriundas de diferentes metodologias, quanto à representatividade das condições físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

## **1.2 MATERIAL E MÉTODOS**

Na Figura 1.1 é apresentado o fluxograma contendo as etapas abordadas na metodologia desse estudo.

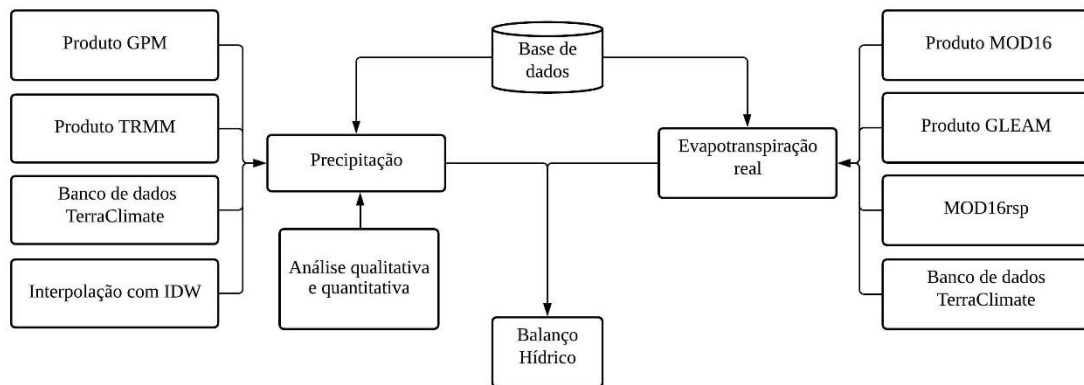


Figura 1.1 - Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.

### 1.2.1 Base de dados

Foram utilizados dados de séries históricas de estações fluviométricas e pluviométricas, da rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da ANA, selecionadas de acordo com a disponibilidade dos dados. O período base, compreendido pelo intervalo de tempo comum a todas as estações que possuem pelo menos 95% dos dados em cada ano, foi definido em 20 anos. Os dados de precipitação e evapotranspiração real, oriundos de imagens de produtos de sensoriamento remoto e do banco de dados espaciais, foram obtidos em escala mensal para o intervalo do período base.

A área de drenagem de cada trecho da bacia hidrográfica foi gerada no software Arcgis 10.5. A partir da aquisição do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 m, disponível na plataforma <https://earthexplorer.usgs.gov/>, foi realizado o preenchimento de depressões espúrias para obtenção do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDEHC). Ressalta-se, que para o processamento e elaboração dos mapas foi adotado sistema de projeção Albers e o Datum SIRGAS - 2000.

### 1.2.2 Precipitação

A obtenção do mapa de precipitação, com informações coletadas em estações pluviométricas, foi realizada com o interpolador da ponderação do inverso da distância (IDW). Além disso, foram realizados testes com imagens do banco de dados espaciais TerraClimate e dos produtos de sensoriamento remoto TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e GPM

(*Global Precipitation Measurement*) com o intuito de determinar quais desses apresentaria melhor desempenho em relação aos dados das estações pluviométricas. Para essa comparação pontual com os diferentes dados espaciais foi utilizado o método ponto-pixel e para os dados interpolados por IDW foi aplicada a validação cruzada. Posteriormente, avaliou-se os resultados por métricas estatísticas.

### **1.2.2.1 Dados de estações pluviométricas**

Considerando a disponibilidade dos dados para confecção do mapa de precipitação, no período base de 1972 a 2013, as estações pluviométricas foram analisadas por meio do diagrama de barras e selecionadas dentro e ao seu entorno da bacia hidrográfica, de modo a garantir a maior cobertura.

A espacialização da precipitação foi feita pelo inverso da potência das distâncias (IDW), considerando o valor da potência igual a 2 e resolução espacial de 1 km. Segundo Mazzini e Schettini (2009), a dinâmica de atribuição de pesos dos dados ocorre de maneira inversamente proporcional à distância, sendo que quanto maior o valor escolhido, menor será a influência dos pontos mais distantes do ponto, o que torna esse método classificado tanto como um interpolador exato ou como um suavizante.

### **1.2.2.2 Precipitação - TerraClimate**

O TerraClimate é um conjunto de dados de clima mensal e balanço hídrico climático para superfícies terrestres globais de 1958 a 2019. Os seus dados de precipitação não apresentam falhas, têm resolução temporal mensal e resolução espacial de aproximadamente  $1/24^\circ$  (~ 4 km) (ABATZOGLOU et al., 2018).

Conforme a disponibilidade dos dados de precipitação foram obtidas imagens, de 1972 a 2013, visando a compatibilização com o intervalo do período base. Após o download das imagens (<http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>), em escala mensal, foi realizado o processamento e elaboração do mapa de precipitação média anual para área de estudo.

### 1.2.2.3 Precipitação - TRMM

O TRMM foi um satélite de pesquisa em operação de 1997 a 2015, com informações disponibilizadas pela plataforma de aquisição de dados da NASA, processados e disponibilizados na forma de matriz de chuvas na escala espacial de  $0,25^\circ$  (~27,5 km) e temporal de 3 horas (LOUZADA, 2016).

Foi realizado o download das imagens em escala mensal, por meio do site <https://gpm.nasa.gov/data/directory>, para o período de 1998 a 2013. Posteriormente, as imagens foram processadas e elaborou-se o mapa de precipitação média anual para área de estudo.

### 1.2.2.4 Precipitação - GPM

O GPM é a missão internacional sucessora global do TRMM. Foi lançada em 2014, com estimativas de precipitação com resolução espacial de  $0,1^\circ$  (~ 12 km) e temporal (30 min) sobre todo o globo terrestre (HOU et al., 2014).

Considerando o período base, foram adquiridas imagens em escala mensal no site <https://gpm.nasa.gov/data/directory>, para o período de 2000 a 2013. Após a obtenção das imagens foi realizado o seu processamento e elaboração do mapa de precipitação média anual para área de estudo.

### 1.2.2.5 Avaliação dos valores da precipitação

Os valores de precipitação gerados pelo interpolador IDW ( $PPT_{IDW}$ ) e pelos produtos de sensoriamento remoto GPM ( $PPT_{GPM}$ ), TRMM ( $PPT_{TRMM}$ ) e TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ) foram avaliados pela comparação do comportamento espacial da precipitação ao longo da bacia hidrográfica e pela aplicação de métricas estatísticas que serão descritas posteriormente.

Para a obtenção dos valores pontuais de precipitação dos produtos de sensoriamento remoto com os valores das estações pluviométricas foi aplicado o método ponto a pixel. Essa metodologia se baseia no registro do valor da precipitação nos locais com mesmas coordenadas geográficas das estações pluviométricas, ou seja, com o pixel das coordenadas. Outros estudos que utilizaram esse método podem ser encontrados na literatura, como por exemplo, Teodoro et al., (2020) e Gadêlha (2018).

Os valores de precipitação obtidos pela interpolação com IDW foram comparados com os valores das estações pluviométricas por meio da validação cruzada por k-fold. Dessa forma, os modelos de estimativa foram ajustados com uma parte dos dados, modelando as falhas para a outra parte omitida e avaliando as estimativas com métricas estatísticas de acurácia (ARLOT e CELISSE, 2010).

Para avaliação das estimativas de precipitação foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 1), que calcula a média dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados, sendo sensível a erros com valores absolutos maiores, o erro médio absoluto (MAE) (Equação 2), que é a média dos erros absolutos realizados pela estimativa em que se tem o mesmo peso para os erros entre os valores estimados frente aos valores observados (FOX, 1981) e o percentual de tendência (PBIAS) (Equação 3), que avalia a tendência média que os dados simulados têm de serem maiores ou menores que os dados observados (GUPTA et al., 1999).

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

$$\text{MAE} = n^{-1} \sum_{i=1}^n | E_i - O_i | \quad (2)$$

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i) 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (3)$$

em que:  $O_i$  = o valor observado da variável dependente  $i$ ;  $E_i$  = o valor estimado da variável dependente  $i$ ;  $n$  = o número de observações.

### 1.2.3 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ETR) foi obtida para toda a bacia hidrográfica com a utilização dos seguintes produtos do sensoriamento remoto: MOD16 do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) satélite TERRA, GLEAM (*Global Land Surface Evaporation: The Amsterdam Methodology*) e TerraClimate. Além disso, para verificar a influência da resolução espacial nos resultados da ETR foi realizada a compatibilização dos dados do produto MOD16 para o tamanho de célula do produto GLEAM, utilizando a função

*resample* do pacote *raster* no software R, com o método "bilinear" *for bilinear interpolation* gerando a imagem denominada MOD16rsp.

A seguir, os produtos de sensoriamento remoto utilizados para a estimativa da evapotranspiração real na bacia hidrográfica são descritos, destacando as principais características da sua composição.

### 1.2.3.1 Imagens do MOD16

O MOD16 foi desenvolvido por meio do algoritmo elaborado por Mu et al., (2007) e aprimorado por Mu et al., (2011) e estima dados para evapotranspiração real, evapotranspiração potencial, fluxo de calor latente real e potencial com base na equação de Penman-Monteith. Além disso, fornece informações com resolução espacial de 1 km<sup>2</sup>, e resolução temporal de 8 dias (MOD16A2), para o período de 2000 a 2014 (MOREIRA et al., 2018; LIAQAT e CHOI, 2017).

Diante da disponibilidade dos dados do MOD16 para o período base definido, foram selecionadas imagens de 2000 a 2013. Após o download dos arquivos no site <https://www.ntsug.umd.edu/project/modis/mod16.php>, foi realizado o preenchimento das células *no data* e o recorte da imagem para área de estudo.

### 1.2.3.2 Imagens do GLEAM

O GLEAM é um conjunto de algoritmos para estimar a evapotranspiração terrestre. Esse modelo foi desenvolvido em 2011 e desde então é revisado regularmente, fornecendo dados diários, em uma escala global e com resolução espacial de 0,25 ° (~27,5 km) (MARTENS et al., 2017).

O GLEAM separa os componentes terrestres da evapotranspiração em três tipos de superfície: solo descoberto, vegetação curta e vegetação com copa alta, sinalizando que a contribuição de superfícies aquáticas não é contabilizada. Além disso, utiliza a equação de Priestley e Taylor para calcular a evapotranspiração potencial que posteriormente é convertida em estimativas de transpiração real ou evaporação do solo, conforme a cobertura terrestre. Atualmente, sua versão mais recente é caracterizada pelo modelo (v3) (MIRALLES et al., 2011; MARTENS et al., 2017).

Para confecção do mapa de evapotranspiração anual proveniente do GLEAM v3, adquiridas imagens, em base mensal, na plataforma <https://www.gleam.eu/#downloads>, no

período de 1980 a 2013. Após o download, foi realizado o preenchimento das células *no data* e as imagens foram recortadas conforme a área de estudo.

### 1.2.3.3 Imagens do TerraClimate

O TerraClimate produz conjuntos de dados mensais de balanço de água de superfície usando um modelo de balanço hídrico climático de Thornthwaite-Mather modificado que incorpora evapotranspiração de referência, precipitação, temperatura e dados de capacidade de armazenamento de água do solo. Os seus dados têm resolução temporal mensal e resolução espacial de  $1/24^\circ$  (~ 4 km) (ABATZOGLOU et al., 2018).

A obtenção das imagens de evapotranspiração real do TerraClimate, para o período de 1972 a 2013, foi realizada por meio do download na plataforma <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>. Em seguida foi realizado o recorte das imagens para a área de estudo.

### 1.2.4 Balanço Hídrico

O balanço hídrico (BH) da bacia hidrográfica foi calculado a partir da combinação entre a precipitação, oriunda de quatro formas distintas (GPM, TRMM, TerraClimate e interpolação por IDW), e a evapotranspiração real proveniente de dados espaciais (MOD16, GLEAM e TerraClimate) e ainda da compatibilização entre a resolução espacial do produto MOD16 com a do produto GLEAM, totalizando 16 combinações.

A compatibilização do tamanho das células (pixels) e a redefinição das projeções do sistema de coordenadas entre as diferentes imagens de precipitação e ETR foi realizada para o melhor ajuste na composição do balanço hídrico. Para isso, as imagens de precipitação foram tomadas como referência.

A avaliação do balanço hídrico foi realizada de acordo com as distribuições espaciais e com a magnitude dos valores ao longo da bacia hidrográfica.

## 1.2.5 Estudo de caso

A aplicação dos procedimentos metodológicos para a obtenção do balanço hídrico mais representativo foi realizada na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, no estado da Bahia, uma vez que possui grande relevância no cenário baiano, principalmente no âmbito de gestão e planejamento de recursos hídricos.

### 1.2.5.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Figura 1) está inserida no estado da Bahia, entre os paralelos 11°11'S e 13°42'S e meridianos 38°48'W e 42°01'W, possui 54.877 km<sup>2</sup> (MEDEIROS, 2003). Essa bacia é a mais importante do estado, sendo responsável pelo abastecimento de 60% da população da região metropolitana de Salvador, que atualmente é a quarta maior cidade do Brasil (GENZ et al., 2012; CIB, 2020).

Segundo a classificação de Köppen, a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu apresenta três tipos de clima: clima semiárido (BSh), predominante na parte central da bacia; clima sub úmido a seco (Aw), na parte superior da bacia, na região da Chapada Diamantina; e clima úmido a sub úmido (Af), no terço inferior da bacia do rio Paraguaçu (GENZ et al., 2012). O período chuvoso se concentra entre os meses de novembro a janeiro e a pluviometria anual varia de 1600 mm a 400 mm. Os biomas variam desde a transição entre caatinga e mata atlântica, caatinga com manchas de floresta estacional até o cerrado (CARELLI e SANTO, 2016).

O rio Paraguaçu nasce numa altitude de aproximadamente 1.200 m, e percorre cerca de 500 km até sua foz (SOUSA et al., 2016). Devido à sua extensão, o rio Paraguaçu é dividido em três partes: Alto Paraguaçu, trecho a montante da confluência do rio Santo Antônio; Médio Paraguaçu entre a foz do Santo Antônio e a barragem de Pedra do Cavalo e Baixo Paraguaçu, trecho a jusante dessa barragem (ANA, 2010). Apesar da relevância econômica, essa bacia hidrográfica está inserida no semiárido baiano, que constitui uma região crítica no que se refere a gestão de recursos hídricos, sendo altamente vulnerável às secas (SILVA, 2012). Na Figura 1.2 é apresentado o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, no estado da Bahia.

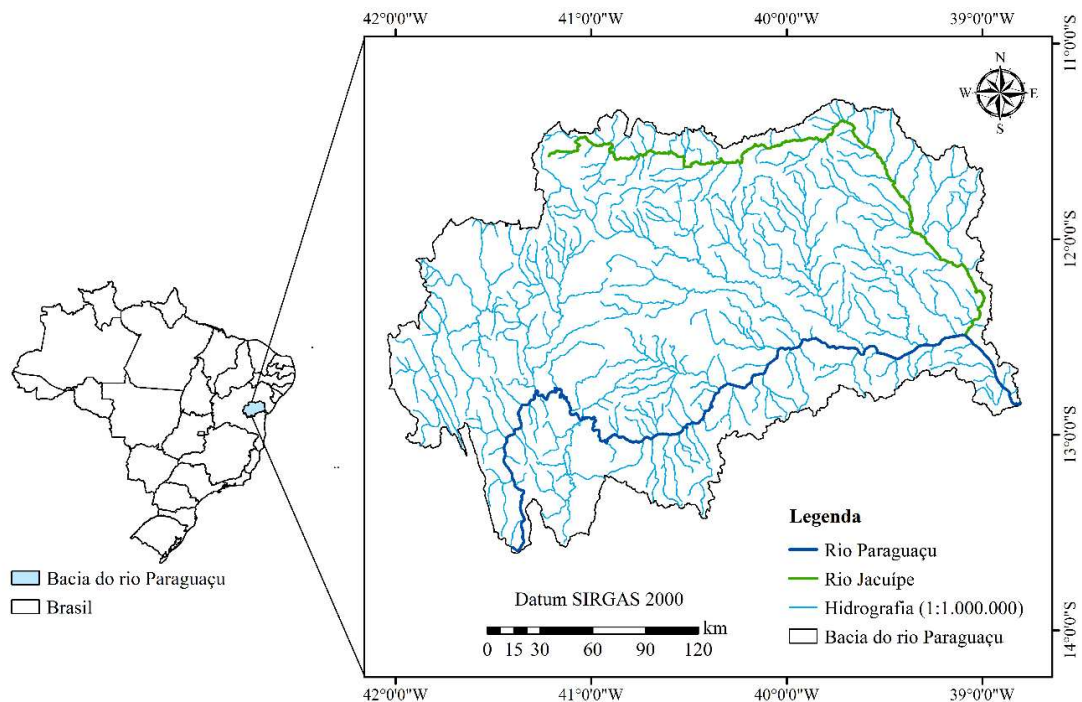


Figura 1.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 1.2.5.2 Seleção dos dados

A partir da análise do diagrama de disponibilidade das estações fluviométricas, foram encontrados dados consistidos até o ano 2013 e não consistidos até o ano de 2018. Dessa forma, optando-se pela confiabilidade dos dados consistidos, definiu-se o ano de 2013 como o limite para esse estudo. Portanto, o período base foi caracterizado entre os anos de 1972 e 2013, sendo composto pelo período com maior quantidade de estações com o mesmo intervalo de dados disponíveis. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2020.

A seleção das estações fluviométricas levou em conta a disponibilidade dos dados dentro do período base definido. Foram encontradas 109 estações fluviométricas, dessas, apenas 14 estações possuíam séries históricas com pelo menos 20 anos de dados, considerando um raio de 50 km ao redor da bacia. Além disso, notou-se que no ano de 2014 apenas 4 estações fluviométricas apresentaram o percentual de falhas acima de 5% e a partir desse ano os dados não eram consistidos.

O mapa com a distribuição espacial das estações fluviométricas, na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, está apresentado na Figura 1.3, identificadas de acordo com o ID apresentado no Apêndice A (Tabela A1).

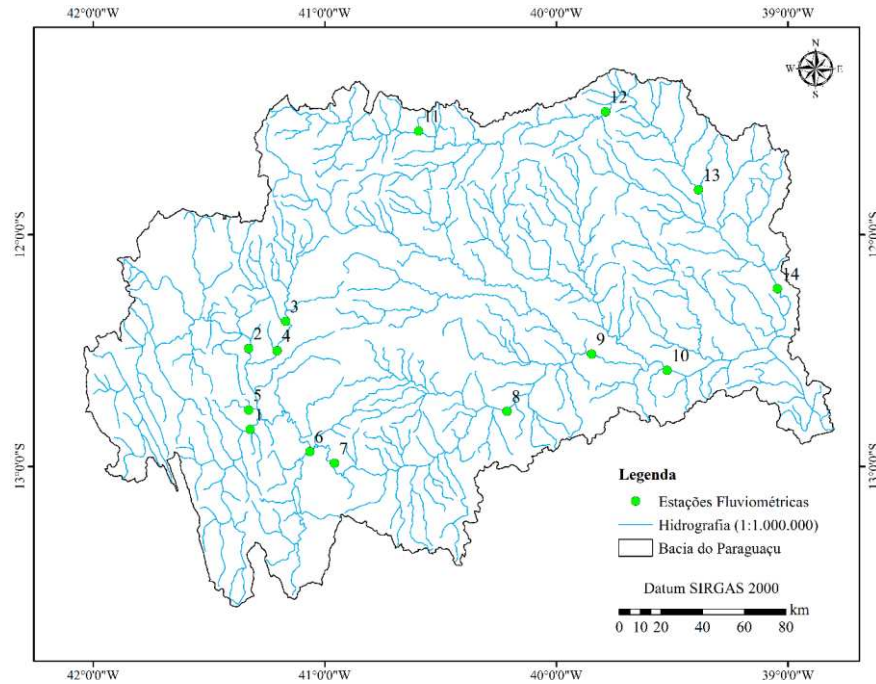


Figura 1.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas da área de estudo.

Na Figura 1.4 é apresentado o mapa com a localização das estações pluviométricas, identificadas de acordo com o ID apresentado no Apêndice A (Tabela A2).

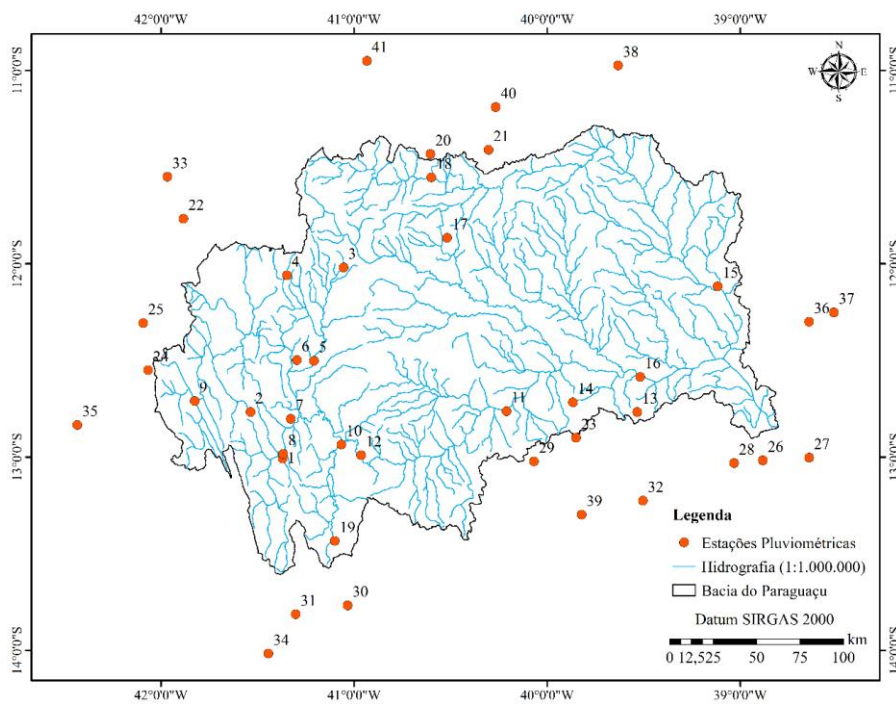


Figura 1.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

A partir da análise de 473 estações pluviométricas, apenas 41 foram selecionadas, perfazendo 8,6% do total. A escolha dessas estações foi embasada no fato de possuírem séries com 20 anos de dados, correspondendo a aproximadamente 50% do período base (1972 - 2013). Dentre as estações pluviométricas selecionadas, 36,8% (15 estações) não possuem dados consistidos na série histórica e apresentam informações somente até o ano 1991, conforme o Apêndice A (Tabela A3).

### **1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Com o intuito de avaliar o desempenho dos componentes do balanço hídrico considerando as diferentes combinações entre a precipitação e a evapotranspiração real, na sequência são apresentados os resultados provenientes das diferentes fontes de informação de precipitação (GPM, TRMM, TerraClimate e interpolação por IDW dos dados de precipitação de estações pluviométricas), evapotranspiração real (MOD16, GLEAM, MOD16rsp e TerraClimate) e, por fim, os balanços hídricos gerados dessas combinações para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

#### **1.3.1 Precipitação**

Na Figura 1.5 estão apresentados os mapas de precipitação provenientes dos produtos de sensoriamento remoto GPM (2000 - 2013), TRMM (1998 - 2013), do banco de dados do TerraClimate (1972 - 2013) e dos dados medidos nas estações pluviométricas e interpolados pelo IDW (1972 - 2013).

Dentre as características inerentes às imagens geradas pelos produtos de sensoriamento remoto, base de dados espaciais e interpoladores, a resolução espacial constitui um atributo importante para identificação das variações dos processos hidrológicos e compreensão dos resultados com maior facilidade.

O produto GPM, mostrado na Figura 1.5 A, possui resolução espacial de  $0,1^\circ$  e apresenta menor sensibilidade à captação das variações da precipitação quando comparado à imagem do TerraClimate, cuja resolução é  $1/24^\circ$  (Figura 1.5 C), diferenças observadas pelo tamanho dos pixels representados nas respectivas imagens. Ambas resoluções possibilitam boa identificação da distribuição da precipitação e das variações na sua magnitude, porém, nota-se que a sensibilidade associada à predição dos produtos se reflete na melhor ou pior caracterização da precipitação, mesmo que possuam resoluções próximas.

O produto TRMM (Figura 1.5 B) registra mudanças consideráveis na distribuição e magnitude nos valores da precipitação, em relação ao produto GPM, porém sua resolução espacial ( $0,25^\circ$ ) não possibilita uma boa discretização desta tendência de variação, principalmente pelas variações abruptas na magnitude em células vizinhas. Já no mapa interpolado por IDW (Figura 1.5 D), a influência do tamanho de célula utilizado na interpolação (1 km) permite a discretização do comportamento da precipitação e se assemelha ao registrado pela  $PPT_{TC}$ .

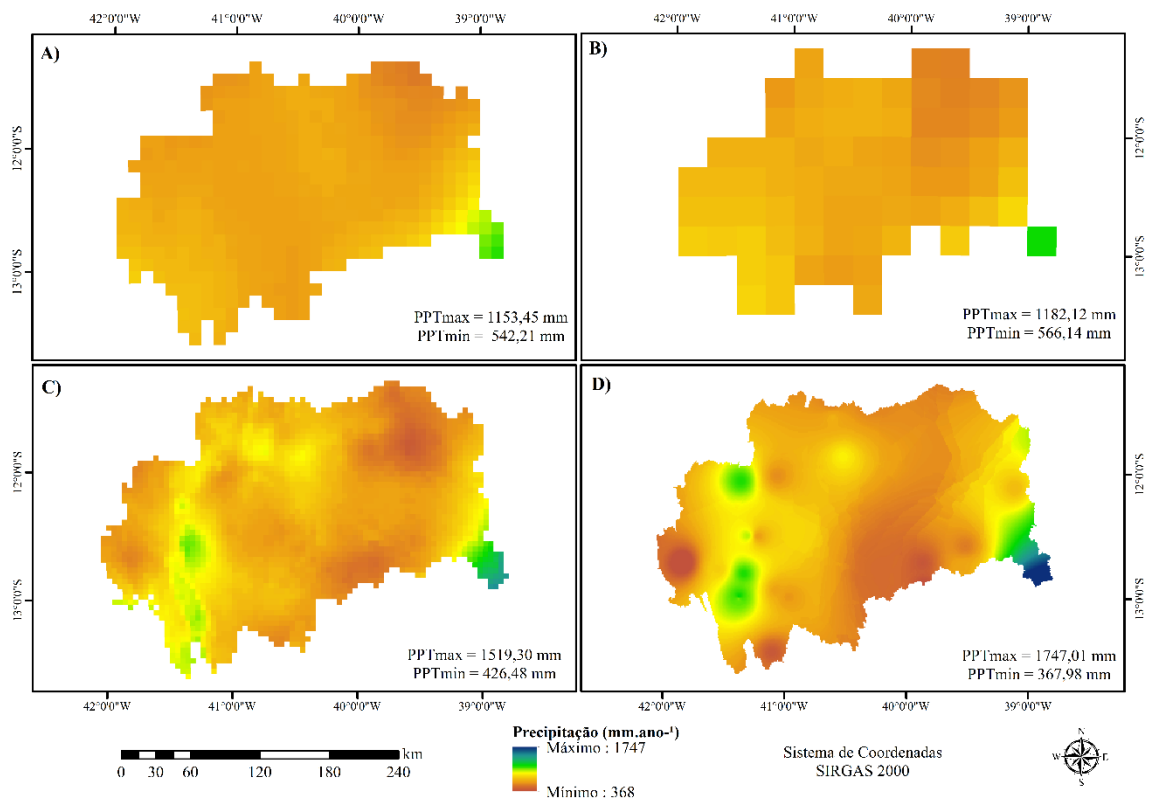


Figura 1.5 - Mapas de precipitação obtidos pelos produtos de sensoriamento remoto GPM (A), TRMM (B), TerraClimate (C) e interpolados por IDW (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada produto.

Além das diferenças nas resoluções das imagens, foram obtidas diferenças expressivas nos aspectos qualitativo e quantitativo da precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu considerando os quatro procedimentos para sua estimativa e espacialização (Figura 1.5).

O produto GPM ( $PPT_{GPM}$ ) (Figura 1.5 A) possui um comportamento caracterizado por regiões suavizadas quanto à tendência de variação da precipitação, com decréscimo do sudoeste para nordeste, predominância de valores abaixo de 620 mm e o aumento gradual dos valores na

região sudeste, aonde atinge seu valor máximo. Uma explicação para essa variação se deve à proximidade com o litoral (Zona da Mata), que conduz a valores mais elevados de precipitação, enquanto na região central da bacia hidrográfica (Zona de Agreste) estão distribuídos os menores valores (TANAJURA et al., 2010; SOUSA, 2016), comportamento que se repete nos demais produtos analisados.

Para o produto TRMM ( $PPT_{TRMM}$ ) (Figura 1.5 B) a taxa de variação espacial é mais abrupta que para a  $PPT_{GPM}$ , apresentando uma tendência contínua de decaimento no valor da precipitação da região sudoeste para nordeste. Além disso, em virtude da resolução espacial do produto TRMM (tamanho dos pixels) há ocorrência de variações abruptas entre células adjacentes na imagem, constituindo visualmente o comportamento mais discrepante em relação aos demais mapas.

Os produtos GPM e TRMM demonstram desempenho convergente na predição das estimativas e apresentam tendência de comportamento próximos, uma vez que o GPM é o sucessor da missão TRMM. Em corroboração, outros estudos também afirmam que o desempenho de ambos é similar (SOUSA, 2016; LELIS et al., 2018), mas que sofrem interferência da região em que são usados ou do tipo de precipitação predominante (SERRÃO et al., 2016; HAMED ASHOURI et al., 2015; ZHOU et al., 2015; ZULUAGA e JUNIOR, 2015). Nesse âmbito, percebe-se que o TRMM possui maior sensibilidade às variações das condições regionais, o que pode ser explicado por sua validação com a precipitação pluviométrica registrada *in situ* (SERRÃO et al., 2016).

Na Figura 1.7 é apresentado o mapa da variação altimétrica na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. O relevo constitui um fator de grande relevância para a explicação das mudanças na distribuição e magnitude da precipitação e na caracterização de climas distintos. Assim, nas áreas com maior altitude tem-se maior umidade e conseqüentemente, maior pluviosidade. Já nas áreas em que a altitude se encontra na faixa de valores menores que 700 m, como o semiárido, a ocorrência das chuvas é comprometida pela grande variabilidade da precipitação, altas temperaturas, alto poder evaporante e evapotranspiração bastante elevada nos períodos mais chuvosos (CARELLI e SANTO, 2016).

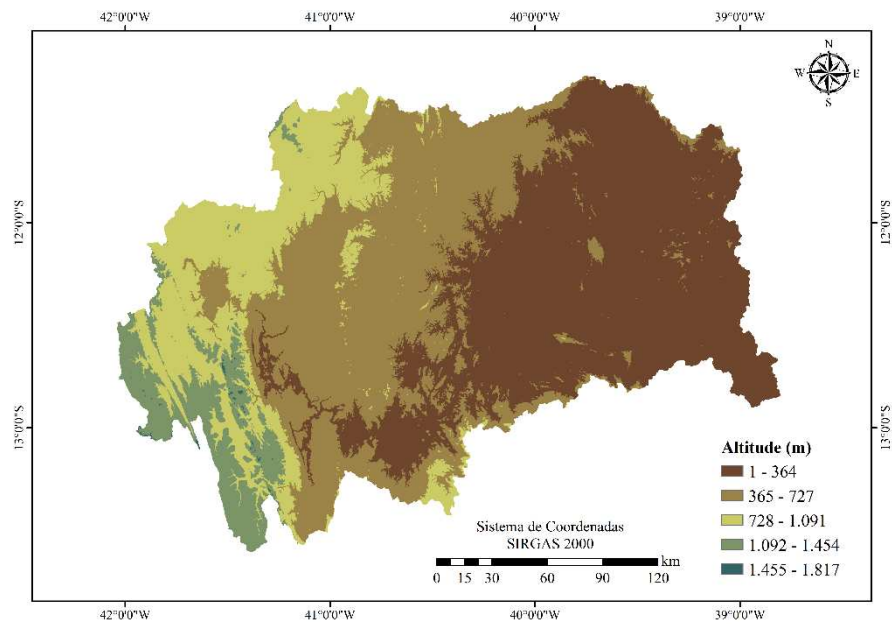


Figura 1.6 - Variação altimétrica na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Entende-se que a calibração das informações por observações de superfície (*in situ*) contribui para o aperfeiçoamento das previsões de produtos de sensoriamento remoto, como o TRMM. Contudo, o comportamento da  $PPT_{TRMM}$  na porção oeste da bacia hidrográfica se distancia do registrado pelos demais produtos, apresentando valores com alta magnitude ( $760 \text{ mm ano}^{-1}$ ) que se distribuem por uma grande área. Segundo Gadêlha (2018) e Macedo (2013) a ocorrência dos valores altos pode ser atribuída, particularmente, ao desempenho das estimativas do produto TRMM em regiões com chuvas orográficas, que ocorrem devido à influência do relevo (Figura 1.6), onde o ar que encontra uma barreira física é forçado a subir e se condensa, podendo causar chuvas de grande intensidade e volume na área de maior altitude (SELUCHI et al., 2011). Outra explicação para a ascensão acentuada dos valores na região oeste da bacia hidrográfica pode ser atribuída às próprias características de predição do TRMM frente a mudanças repentinas da precipitação em locais pontuais, efeito também mencionado em outros estudos e associado à tendência de superestimativa da precipitação (ROZANTE et al., 2010; YANG e NESBITT, 2014; ABREU et al., 2020).

Observa-se que os dados do TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ) (Figura 1.5 C) e os interpolados por IDW ( $PPT_{IDW}$ ) (Figura 1.5 D) não mantêm um gradiente contínuo nos valores de precipitação, apresentando uma faixa de maior magnitude na parte oeste da bacia hidrográfica e variações mais suavizadas nas demais regiões. Tanajura et al., (2010) e Sousa (2016) afirmam que o efeito orográfico, que abrange a Chapada Diamantina (oeste da bacia) proporciona pluviosidade acima da média para regiões de clima semiárido (índices que superam  $1000 \text{ mm ano}^{-1}$ ). Todavia,

apenas as variáveis  $PPT_{TC}$  e  $PPT_{IDW}$  produziram estimativas com essa ordem de grandeza para a região oeste ( $1060 \text{ mm ano}^{-1}$  e  $1050 \text{ mm ano}^{-1}$ , respectivamente).

A captura das variações da precipitação pelo TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ) possui boa sensibilidade, consolidando de forma mais nítida a transição da variação espacial, que tende a acompanhar o relevo da bacia (Figura 6). Já a  $PPT_{IDW}$  é representada pelos ditos “olhos de boi” e possui maior definição em relação as variações da magnitude no oeste da bacia hidrográfica. São tendências similares obtidas por produtos distintos, onde cada um possui sua particularidade.

Normalmente, a presença dos ditos “olhos de boi” atribui-se à escassez de medidores, provocando a formação de superfícies concêntricas em volta das estações pluviométricas, como ocorre na região oeste da bacia hidrográfica. Além disso, destaca-se a região nordeste da bacia hidrográfica, que devido à ausência de estações pluviométricas na interpolação por IDW foram geradas extrapolações com valores superiores para o balanço hídrico no semiárido (Figura 1.5).

Apesar das oscilações inerentes às diferentes fontes de precipitação, percebe-se que, com exceção da  $PPT_{GPM}$ , as demais estimativas apresentaram maior sensibilidade às variações da magnitude e da distribuição espacial ocorridas na bacia. Destaca-se ainda que as variáveis  $PPT_{GPM}$  e a  $PPT_{TRMM}$  apresentaram comportamentos mais similares entre si. Do mesmo modo, as variáveis  $PPT_{TC}$  e  $PPT_{IDW}$  foram as que mais se aproximaram entre si e dos resultados descritos em outros estudos acerca do comportamento do regime pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Paraguai (SOUSA 2016; MACEDO, 2013; TANAJURA et al., 2010; BAHIA, 1996).

Além da proximidade da magnitude nas estimativas da precipitação na região oeste da bacia hidrográfica, as variáveis  $PPT_{IDW}$  e  $PPT_{TC}$  também apresentam comportamento espaciais correspondentes. Acrescenta-se ainda que a informação do banco de dados TerraClimate contempla integralmente o período base correspondente às precipitações consideradas no estudo (1972 a 2013) e, portanto, pode ter contribuído para maior aproximação com os resultados da  $PPT_{IDW}$ .

Com relação à análise qualitativa da precipitação, verifica-se que a amplitude de variação da precipitação estimada pelos quatro métodos é inferior a amplitude dos dados observados nas estações pluviométricas na bacia. Além disso, a amplitude anual dos produtos GPM (542 a 1151 mm) e TRMM (566 a 1182 mm) caracterizaram as menores faixas de variação dentre os produtos estudados, com redução de 804 e 773 mm, respectivamente, nos valores máximos em relação aos dados das estações pluviométricas, e com faixa de variação

correspondente a 38,4 e 38,8%, respectivamente, do valor da faixa de variação dos dados observados.

A faixa de variação da amplitude anual da precipitação do TerraClimate (426 a 1520 mm) correspondeu a 68,9% da variação dos dados das estações pluviométricas e os valores dos seus limites superiores se distanciaram em 435 mm. Contudo, a amplitude da PPT<sub>TC</sub> foi mais próxima da obtida pela PPT<sub>IDW</sub> (367 a 1747 mm). Essa, por sua vez, apresentou a menor diferença aos valores registrados nas estações pluviométricas. Entende-se que em decorrência das interferências atribuídas ao método de interpolação, o valor máximo gerado pelo IDW (1747 mm) foi 11% menor que o dos dados primários obtidos nas estações pluviométricas (1955 mm).

Em suma, no que se refere à magnitude das precipitações analisadas na Figura 1.5, observa-se que a PPT<sub>IDW</sub> foi a que produziu a maior amplitude (1379 mm ano<sup>-1</sup>) e, em contrapartida, a PPT<sub>GPM</sub> gerou a menor (611 mm ano<sup>-1</sup>), representando uma redução de 55,7% na faixa de variação em relação PPT<sub>IDW</sub> e 596 mm de diferença entre os valores máximos. Além disso, ao verificar o valor médio anual das precipitações, notou-se que o menor valor foi registrado pela PPT<sub>TRMM</sub> (682 mm ano<sup>-1</sup>), enquanto o maior também foi obtido pela PPT<sub>IDW</sub> (743 mm). Valério e Fragoso Junior (2015) também encontraram valor similar ao obtido pela PPT<sub>IDW</sub>, para a mesma bacia hidrográfica, utilizando o período de dados de 1960 a 1990. Embora, a PPT<sub>IDW</sub> tenha gerado o maior valor médio com relação as demais estimativas, quando comparada com o valor médio da precipitação das estações pluviométricas (802 mm), nota-se que foi 7,4% menor.

Na Tabela 1.1 são apresentados os resultados dos índices estatísticos (MAE, RMSE e PBIAS) utilizados para a comparação dos resultados dos valores de precipitação obtidos pelas diferentes fontes de dados espaciais, em relação à precipitação de cada estação pluviométrica desse estudo.

Tabela 1.1 - Índices estatísticos calculados para comparação dos dados de precipitação

<b>Índices</b>	<b>PPT<sub>IDW</sub></b>	<b>PPT<sub>TC</sub></b>	<b>PPT<sub>TRMM</sub></b>	<b>PPT<sub>GPM</sub></b>
MAE	135,10	85,91	155,14	172,87
RMSE	135,51	120,39	215,26	239,24
PBIAS	8,54	2,30	-1,80	-4,30

Nota-se que as precipitações provenientes dos produtos GPM e TRMM apresentam valores altos para os índices MAE e RMSE, indicando que as estimativas foram pouco acuradas. Com relação ao valor do PBIAS, percebe-se que os valores foram negativos, indicando tendência de subestimativa em relação aos valores das estações pluviométricas.

Os resultados referentes ao produto GPM corroboram com Teodoro et al., (2020), que ao avaliarem a precisão do produto GPM numa bacia hidrográfica do sudeste do Brasil, observaram tendência de subestimativas em relação aos dados medidos por pluviômetros. Acrescenta-se ainda que a subestimativa desses resultados pode estar relacionada ao curto intervalo de dados disponíveis para o GPM (2000 - 2013), sendo o menor intervalo desse estudo.

Nota-se que a tendência de subestimativa dos resultados do produto TRMM também é refletida por sua média anual e amplitude, cujos valores foram, respectivamente 8,2% e 53,3%, menores que os valores das estações pluviométricas. Saliencia-se que esse comportamento já foi registrado por outros autores, que destacaram a mudança repentina da precipitação em locais pontuais nas bacias hidrográficas, estando sujeitas a tendências de sub ou superestimativas (ALMEIDA, 2015; CERA e FERRAZ, 2015; LEIVAS et al., 2009; COLLISCHONN et al., 2006). Dessa forma, mesmo que haja indicativo de subestimação da  $PPT_{TRMM}$ , no contexto geral, o comportamento ao longo da bacia hidrográfica é variável.

A variável  $PPT_{IDW}$  apresentou valores altos para os índices MAE e RMSE, os quais foram similares entre si e indicaram baixa acurácia das estimativas em relação aos dados observados, apesar disso, os erros foram menores que os registrados pela  $PPT_{GPM}$  e  $PPT_{TRMM}$ . No que se refere ao índice PBIAS, o valor positivo, com magnitude superior aos demais, indicou tendência de superestimativa em relação aos valores observados. O desempenho da  $PPT_{IDW}$  evidencia que as interferências decorrentes do método de interpolação por IDW nem sempre conduzem a resultados satisfatórios.

No que se refere à  $PPT_{TC}$ , os valores obtidos para os índices MAE e RMSE foram os menores dentre as variáveis (85,91 e 120,39, respectivamente), e mostraram que a  $PPT_{TC}$  foi a variável com maior acurácia. Em relação ao índice PBIAS, nota-se que o valor positivo (2,30) indica que os dados estimados tendem a ser maiores que os medidos.

Nesse sentido, destaca-se que além de apresentar o melhor desempenho estatístico em relação aos dados das estações pluviométricas, a  $PPT_{TC}$  foi a variável que apresentou maior sensibilidade às variações da distribuição espacial da precipitação, possibilitando a discretização de cada região, do efeito orográfico no oeste e da aridez no nordeste da bacia hidrográfica. Além disso, a variação na magnitude dos valores ao longo da bacia do rio

Paraguaçu é correspondente ao descrito na literatura. Portanto, a variável  $PPT_{TC}$  foi a que conduziu à maior representatividade do comportamento da precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 1.3.2 Evapotranspiração real

Na Figura 1.7 são apresentados os mapas da evapotranspiração real provenientes dos produtos de sensoriamento remoto: MOD16 (2000 - 2013), GLEAM (1980 - 2013), MOD16rsp (2000 - 2013) e do banco de dados TerraClimate (1972 - 2013).

A identificação do comportamento da ETR é facilitada pela resolução espacial dos produtos de sensoriamento remoto. Como pode ser observado na Figura 1.7 A, o produto MOD16, que possui a melhor resolução dentre as imagens analisadas (1 km), apresenta melhor discretização do comportamento da ETR ao longo da bacia hidrográfica. Esse comportamento é bem definido pela distribuição espacial e altamente sensível às variações da magnitude, fato evidenciado pelas mudanças bruscas nos valores da ETR em regiões muito próximas.

Para a imagem oriunda do produto GLEAM (Figura 1.7 B), o padrão de variação dos valores da ETR não é bem definido, tendência que decorre da resolução espacial ( $0,25^\circ$ ), e que dificulta uma melhor compreensão da variação da ETR ao longo da bacia hidrográfica. Somado a essa dificuldade, tem-se a ocorrência de oscilações bruscas nas magnitudes da ETR, porém de maneira pontual, ou seja, em células vizinhas. Esses aspectos caracterizam a importância da resolução espacial para a obtenção de imagens com padrões de comportamento mais definidos e para o melhor entendimento na análise dos resultados.

O mapa da  $ETR_{MOD16rsp}$  (Figura 1.7 C), gerado a partir da compatibilização da resolução espacial do produto MOD16 com a do produto GLEAM ( $0,25^\circ$ ), apresenta tendência de variação dos valores correspondente ao padrão do comportamento da  $ETR_{MOD16}$ . Além disso, nota-se que a mudança na resolução espacial da imagem originada do MOD16 implica na perda da capacidade de discretização atribuída ao produto, e confere à  $ETR_{MOD16rsp}$  a mesma dificuldade de caracterização da ETR registrada para o produto GLEAM.

A ETR obtida pelo TerraClimate (Figura 1.7 D) agrega facilidade na identificação do comportamento espacial da ETR, apresentando boa definição na caracterização das diferentes magnitudes da ETR e suavização nas áreas de transição dos valores ao longo da bacia hidrográfica.

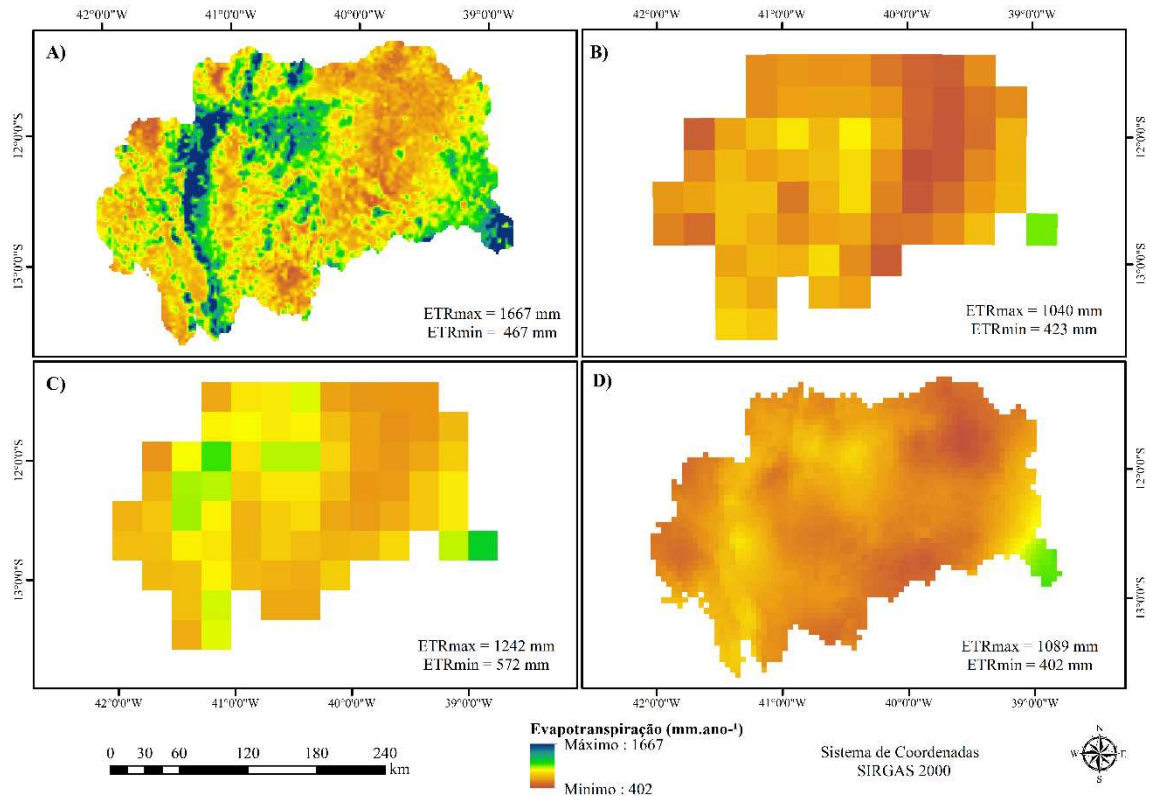


Figura 1.7 - Mapas de evapotranspiração real obtidos pelos produtos MOD16 (A), GLEAM (B) e MOD16rsp (C) e TerraClimate (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada produto.

Os resultados da evapotranspiração real provenientes de quatro produtos distintos caracterizam-se por diferenças na discretização dos comportamentos espaciais e das variações da magnitude ao longo da bacia hidrográfica (Figura 1.7). Não obstante, todos os produtos conduziram a menores valores de evapotranspiração real na região nordeste da bacia hidrográfica e ao aumento gradativo da magnitude da ETR no sentido da foz.

O produto MOD16 ( $ETR_{MOD16}$ ) (Figura 1.7 A) apresenta variações mais acentuadas dos valores da ETR na porção intermediária da bacia hidrográfica. Tais características podem estar relacionadas com as variações de altitude, das condições/características de uso do solo, do tipo de vegetação e das condições climáticas (RIBEIRO, 2020; COMPAORÉ et al., 2008), e serem justificadas pelos aspectos considerados no cálculo da ETR pelo MOD16, o qual realiza uma classificação global de uso e ocupação da terra, em que são caracterizadas 17 classes distintas (FRIEDL et al., 2002). Além disso, salienta-se a influência da elevada altitude na Chapada Diamantina (1.720 m), localizada na parte oeste da bacia hidrográfica (PEREIRA,

2010), da ocorrência de chuvas orográficas e da variação do clima de sub úmido a seco (GENZ et al., 2012).

Segundo Ribeiro (2020), por possuir pixel de 1 km<sup>2</sup>, as imagens oriundas do MOD16 proporcionam grande detalhamento, porém, podem resultar em inconsistências na estimativa da ETR, como pode ser constatado pela faixa de variação da sua amplitude (467 a 1.667 mm ano<sup>-1</sup>), maior dentre todos produtos, e pelo elevado valor médio da ETR<sub>MOD16</sub> (792 mm ano<sup>-1</sup>). Essas variações podem ser atribuídas aos erros relacionados à classificação imprecisa dos tipos de cobertura da terra e às incertezas associadas aos dados de entrada, tais como a fração fotossinteticamente ativa, o índice de área foliar e aos dados meteorológicas de reanálise do GMAO (*Global Modeling and Assimilation Office*) (MU et al., 2011; KIM et al., 2012).

No mapa de evapotranspiração real proveniente do produto GLEAM (ETR<sub>GLEAM</sub>) (Figura 1.7 B) as variações na magnitude se distribuem de modo indefinido, principalmente devido às oscilações dos valores em células adjacentes. Esse comportamento pode ser atribuído às características consideradas no cálculo da ETR do produto GLEAM, que 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., 2011; MARTENS et al., 2017). Observa-se também a predominância de valores na faixa de 700 mm ano<sup>-1</sup> na parte intermediária da bacia hidrográfica, e o declínio da magnitude dos valores na região nordeste. A faixa de variação da amplitude da ETR<sub>GLEAM</sub> é a menor dentre os produtos (402 a 1.039 mm ano<sup>-1</sup>) e sua média anual é de 650 mm.

As distribuições espaciais da ETR<sub>MOD16</sub> e da ETR<sub>GLEAM</sub> seguem a tendência de variação da precipitação na bacia hidrográfica, com altas magnitudes da ETR nas regiões com maiores índices pluviométricos e menores magnitudes nas porções em que esses índices são mais baixos. Essa variação já foi registrada por Moreira et al., (2019b) na região do pantanal brasileiro, e por Moreira e Ruhoff (2019c) em oito bacias hidrográficas brasileiras, em que analisaram o desempenho do produto MOD16 e do GLEAM e notaram que para a região hidrográfica do Atlântico Leste, onde a bacia do rio Paraguai está inserida, ambos tendem a acompanhar a ocorrência das chuvas. Ressalta-se que esse comportamento pode estar relacionado a fatores como radiação solar, temperatura do ar, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar e a pressão atmosférica (MARTINS e ROSA, 2019) característicos do clima semiárido.

Para o mapa da ETR<sub>MOD16rsp</sub> (Figura 1.7 C) nota-se que as maiores magnitudes se concentram na parte intermediária da bacia hidrográfica e junto à foz, e os valores mínimos se distribuem na região nordeste, numa parcela da região central e no extremo oeste da bacia. O

valor médio da  $ETR_{MOD16rsp}$  (792 mm ano<sup>-1</sup>) é igual ao obtido pela  $ETR_{MOD16}$  (792 mm ano<sup>-1</sup>), entretanto a amplitude de variação dos seus valores é menor (572 a 1.242 mm ano<sup>-1</sup>).

O TerraClimate ( $ETR_{TC}$ ) (Figura 1.7 D) apresenta melhor caracterização das variações na magnitude e na distribuição espacial da ETR que a  $ETR_{GLEAM}$  e a  $ETR_{MOD16rsp}$ . Assim, registra o aumento acentuado dos valores na parte intermediária da bacia hidrográfica, região que engloba a Chapada Diamantina, e o seu decrescimento à medida que se aproxima da região nordeste da bacia. Salienta-se o aumento gradativo dos valores no sentido da foz e a mudança da  $ETR_{TC}$  frente à variação precipitação. O TerraClimate usa interpolação auxiliada pelo clima, combinando normais climatológicas de alta resolução espacial do conjunto de dados WorldClim (ABATZOGLOU et al., 2018). Por fim, verifica-se que a amplitude da  $ETR_{TC}$  variou de 402 a 1.089 mm ano<sup>-1</sup> e o seu valor médio anual (639 mm) foi o menor dentre os produtos.

Em suma, os produtos MOD16 e TerraClimate, que possuem as maiores resoluções espaciais, são os que apresentam as maiores amplitudes. Já a  $ETR_{MOD16\_GLEAM}$  produz uma faixa de variação com intervalo e magnitude inferiores à variável de origem  $ETR_{MOD16}$ . Comportamento que também se relaciona ao menor grau de detalhamento da sua resolução espacial, visto que pixels menores tem melhor capacidade de representarem as diferentes mudanças do uso da terra, e com isso refletirem diretamente a resposta da ETR (KHAN et al., 2018; RUHOFF et al., 2013).

Diante da avaliação das imagens de evapotranspiração real na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, nota-se que os mapas de ETR são influenciados pelas variações da precipitação. Contudo, dentre as informações obtidas pelos produtos, a variável  $ETR_{TC}$  conduz aos resultados mais consistentes em termos de distribuição espacial e magnitude dos valores em cada região, caracterizando variações como o efeito orográfico, influência da proximidade com o litoral e o clima semiárido. Portanto, considerando seu desempenho, a  $ETR_{TC}$  foi a variável que melhor representou o comportamento da evapotranspiração real na bacia hidrográfica.

### 1.3.3 Balanço Hídrico

Com o intuito de avaliar a representatividade do balanço hídrico nos processos de circulação da água na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu são apresentados os testes com combinações entre as imagens de precipitação e evapotranspiração real, provenientes de formas distintas de obtenção. Portanto, faz-se necessário determinar qual combinação apresenta melhor desempenho e se as imagens com melhor desempenho na avaliação individualizada produzem

os melhores resultados, quando combinadas. Ressalta-se que a resolução espacial dos balanços hídricos apresentados nesse tópico foi definida com base na resolução de cada fonte de precipitação.

Na Figura 1.8 estão apresentados os mapas dos balanços hídricos considerando a precipitação proveniente do produto GPM, combinada com quatro fontes distintas de evapotranspiração real ( $ETR_{MOD16}$ ,  $ETR_{MOD16rsp}$ ,  $ETR_{GLEAM}$  e  $ETR_{TC}$ ).

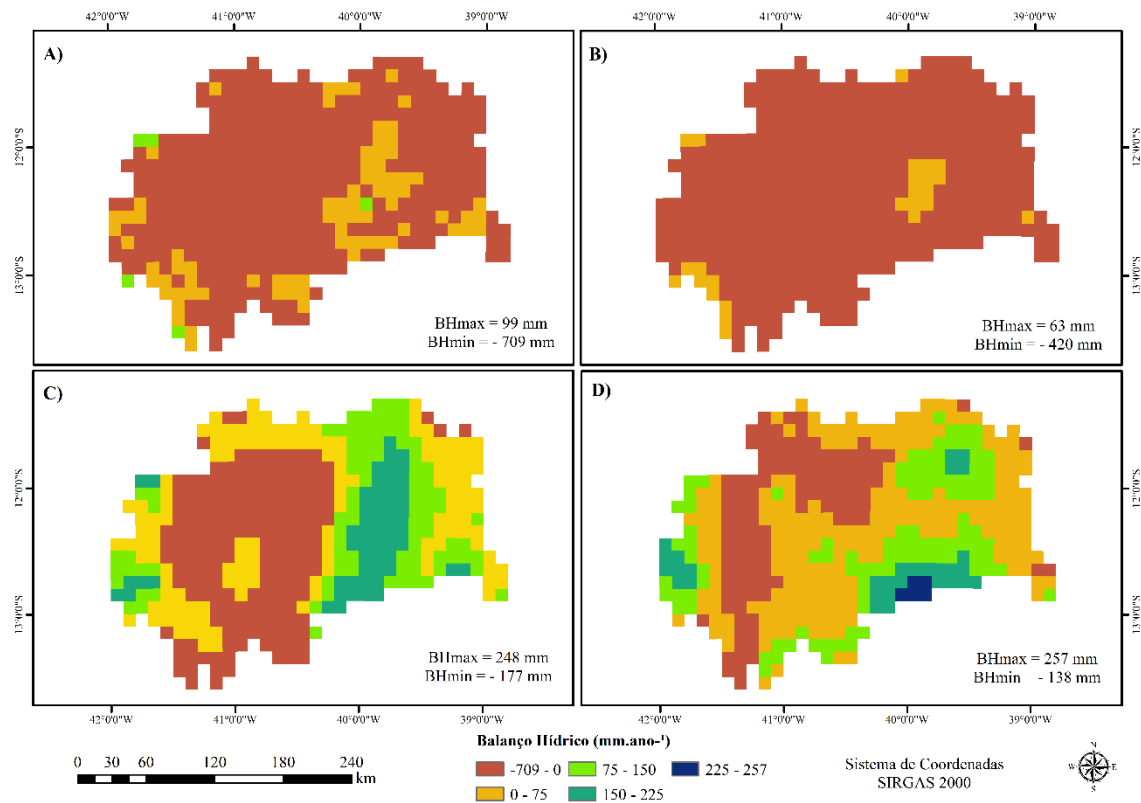


Figura 1.8 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do GPM e ETR de diferentes produtos:  $ETR_{MOD16}$  (A),  $ETR_{MOD16rsp}$  (B),  $ETR_{GLEAM}$  (C) e  $ETR_{TC}$  (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.

Os mapas dos balanços hídricos  $BH_{GPM\_MOD16}$  e  $BH_{GPM\_MOD16rsp}$ , mostrados nas Figuras 1.8 (A e B), apresentam comportamento irregular quanto à distribuição espacial e magnitude dos valores ( $-709$  a  $99$  mm ano<sup>-1</sup> e  $-420$  a  $63$  mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente), em que se destaca a grande extensão de áreas com valores negativos acentuados (respectivamente, 82,17% e 94,56%). Este comportamento pode ser justificado pela tendência do produto MOD16 apresentar valores de evapotranspiração maiores que a precipitação (MIRALLES, 2016),

devido à dificuldade em estimar de forma consistente a evapotranspiração (PANDAY et al. 2015; RUHOFF et al., 2013).

A presença dos valores negativos no BH representa uma limitação que pode estar atribuída à existência de inconsistências dos dados de entrada do produto, à discretização proporcionada pela resolução espacial e ao menor desempenho do produto em regiões com influência orográfica ou em regiões de clima semiárido, as quais possuem grande variabilidade da precipitação e alto poder evaporante da ETR.

A ocorrência do balanço hídrico negativo é fisicamente improvável, visto que, considerando a variação do armazenamento de água constante, ele resulta da diferença entre a quantidade de água que entra por precipitação menos a quantidade de água que sai por evapotranspiração (SENTELHAS et al., 1999). Portanto, espera-se que o BH possua valor maior ou igual a zero. A ocorrência dos valores negativos implicaria na inexistência dos cursos d'água, caracterizando o “sumiço” da água sem uma justificativa física. Do mesmo modo que, valores próximos ou iguais a zero conduziram na intermitência dos rios, já que esses valores não seriam suficientes para garantir a manutenção/permanência de vazões mínimas, cenário que também não reflete as condições das áreas negativas na bacia hidrográfica.

Um fator determinante para a existência dos valores negativos no balanço hídrico consiste na dificuldade de estimativa das variáveis, como a evapotranspiração, que possui uma maior limitação para o seu estabelecimento em grandes escalas espaciais (WANG et al., 2014). Fator que, como visto para o MOD16, pode conduzir a erros fortemente relacionados aos dados de entrada utilizados na geração do produto, como classificações imprecisas dos tipos de cobertura da terra, albedo, índice de área foliar e dados meteorológicos globais, os quais possuem resolução espacial grosseira e não são validados para todas as condições no qual é aplicado (KIM et al., 2012; RAMOELO et al., 2014; MOREIRA et al., 2018).

Diante das limitações inerentes ao predomínio de valores negativos no BH, os autores Moreira e Ruhoff, (2017) sugerem a análise de outras bases de dados de evapotranspiração na estimativa do balanço hídrico por sensoriamento remoto. Nesse sentido, a utilização de balanços hídricos com tais características (Figuras 1.8 A e B) devem ser descartados, visto que não são representam os processos hidrológicos na bacia hidrográfica e produzem discrepâncias que contrariam os indícios físicos da bacia hidrográfica.

Na Figura 1.9 está apresentado o mapa da tipologia climática da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

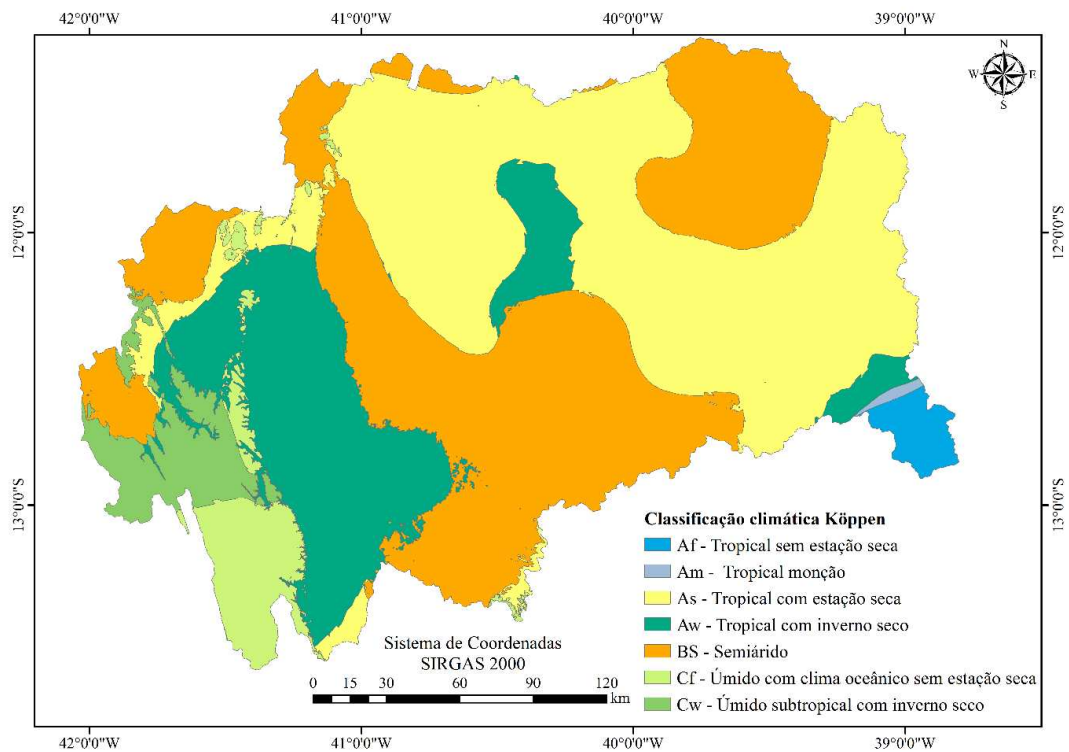


Figura 1.9 - Tipos climáticos existentes na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Fonte: Adaptado de Alvares et al., (2013).

Nos balanços hídricos  $BH_{GPM\_GLEAM}$  e  $BH_{GPM\_TC}$  (Figuras 1.8 C e D) a ocorrência dos valores negativos (40% e 25%, respectivamente) se concentra na região com efeito orográfico e se estende pelo semiárido (Figura 1.9) de forma menos acentuada que os BH anteriores. Em geral, a existência do efeito orográfico produziu o aumento abrupto dos valores em todas as estimativas de ETR nesse estudo, devido às grandes variações de altitude (SILVA et al., 2012) e às transições do clima, de semiárido para sub úmido a seco. Ressalta-se a influência dos produtos nesse processo, uma vez que a precipitação ( $PPT_{GPM}$ ) não foi alterada nos mapas. A faixa de variação anual dos valores do  $BH_{GPM\_GLEAM}$  e  $BH_{GPM\_TC}$  (-177 a 248 mm e -138 a 257 mm, respectivamente) evidenciam o aumento na magnitude dos valores positivos e redução na magnitude dos valores negativos em relação aos BH já apresentados.

Na Figura 1.10 estão apresentados os mapas de balanço hídrico considerando a precipitação proveniente do produto TRMM, combinada com quatro fontes distintas de evapotranspiração real ( $ETR_{MOD16}$ ,  $ETR_{MOD16rsp}$ ,  $ETR_{GLEAM}$  e  $ETR_{TC}$ ).

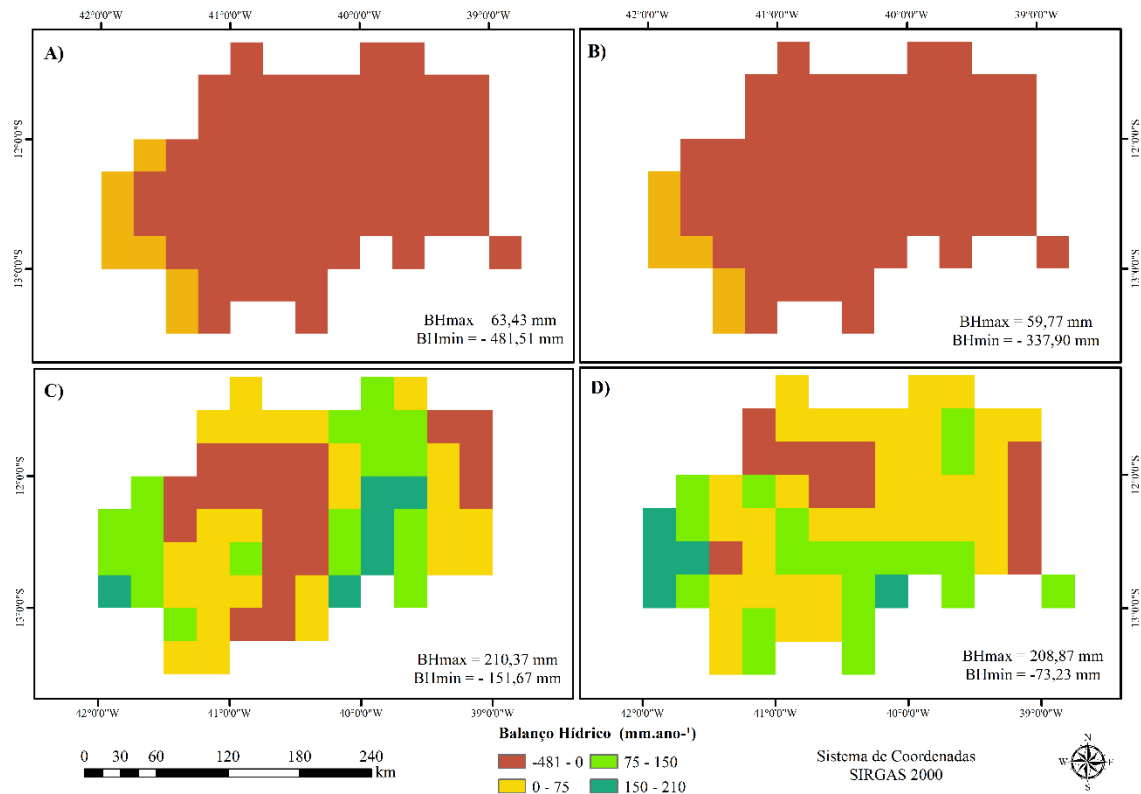


Figura 1.10 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do TRMM e ETR de diferentes produtos:  $ETR_{MOD16}$  (A),  $ETR_{MOD16rsp}$  (B),  $ETR_{GLEAM}$  (C) e  $ETR_{TC}$  (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.

Os balanços hídricos  $BH_{TRMM\_MOD16}$  e  $BH_{TRMM\_MOD16rsp}$  (Figuras 1.10 A e B), apresentam características semelhantes quanto a distribuição espacial dos valores, com amplitudes ( $-482$  a  $63 \text{ mm ano}^{-1}$  e  $-338$  a  $60 \text{ mm ano}^{-1}$ , respectivamente) que refletem o grande percentual de áreas com valores negativos (91% e 93%, nessa mesma ordem). Observa-se que o uso da ETR do produto MOD16 continua produzindo as maiores inconsistências no cálculo do balanço hídrico e gerando altas magnitudes nos valores negativos (verificar Figuras 1.8 A e B). Além disso, a magnitude e distribuição dos valores negativos mostram que além das inconsistências no cálculo do BH, as combinações de variáveis com desempenhos insatisfatórios conduzem a resultados ruins.

Observa-se que nas Figuras 1.10 (C e D), o  $BH_{TRMM\_GLEAM}$  e o  $BH_{TRMM\_TC}$  apresentam comportamento caracterizado por variações acentuadas na distribuição espacial dos valores, cuja amplitude ( $-152$  a  $210 \text{ mm ano}^{-1}$  e de  $-73$  a  $208 \text{ mm ano}^{-1}$ , respectivamente) abrange valores negativos que se localizam na porção intermediária e na região nordeste da bacia hidrográfica, e ocupam cerca de 30% e 16% da área total. Embora a extensão da área ocupada pelos BH

negativos esteja menor que os dois citados anteriormente, sua ocorrência está atrelada à tendência de estimativa da ETR pelos produtos GLEAM e TerraClimate, que possuem maior sensibilidade à tipologia climática e ao relevo. Fatores que também evidenciam o melhor desempenho do produto GLEAM para regiões mais úmidas, visto que conduz à tendência de ocorrência de valores negativos nas regiões de clima semiárido. Já o produto TerraClimate apresenta melhor desempenho em regiões com menores precipitações, com tendência de ocorrência valores negativos nas regiões de clima sub úmido a seco (Figura 1.9). Salienta-se que ambos apresentam desempenho melhor que o produto MOD16 ao longo da bacia.

Dentre as combinações utilizando a  $PPT_{GPM}$  e a  $PPT_{TRMM}$ , o  $BH_{TRMM\_TC}$  foi a combinação que apresentou menor percentual e magnitude nos valores negativos. Porém, do ponto de vista qualitativo, seu comportamento não configura um padrão representativo das condições de circulação da água na bacia hidrográfica.

Na Figura 1.11 estão apresentados os mapas de balanço hídrico considerando os dados de precipitação de postos pluviométricos, interpolados por IDW, combinados com quatro fontes distintas de evapotranspiração real ( $ETR_{MOD16}$ ,  $ETR_{MOD16rsp}$ ,  $ETR_{GLEAM}$  e  $ETR_{TC}$ ).

Os balanços hídricos  $BH_{IDW\_MOD16}$  e  $BH_{IDW\_MOD16rsp}$  Figuras 1.11 (A e B) apresentam variações espaciais próximas entre si, compostas majoritariamente por valores negativos (cerca de 58% e 70% da área total). Nesse caso, essas inconsistências podem estar associadas à insuficiência de estações pluviométricas para capturar a variabilidade espacial da precipitação e dar suporte ao nível de detalhamento apresentado no mapa (RIBEIRO, 2020). Assim, destaca-se a região nordeste da bacia hidrográfica, onde a ausência de estações pluviométricas produziu extrapolações nas estimativas da interpolação por IDW e conduziu a valores superiores para o comportamento do balanço hídrico atribuído à região semiárida. A amplitude de variação do  $BH_{IDW\_MOD16}$  é a maior dentre todos os mapas (-772 a 855  $\text{mm ano}^{-1}$ ) e o  $BH_{IDW\_MOD16rsp}$  apresenta a menor amplitude anual, variando de -394 a 533 mm.

Em relação ao  $BH_{IDW\_GLEAM}$  (Figura 1.11 C) observa-se que a tendência de variação dos valores na bacia hidrográfica (-242 a 731  $\text{mm ano}^{-1}$ ) corresponde ao comportamento da precipitação  $PPT_{IDW}$ , especialmente ao estimar valores altos na porção nordeste da bacia hidrográfica e gerar as áreas com valores negativos (24,88%) nas regiões com menor índice pluviométrico, como a parte central da bacia hidrográfica.

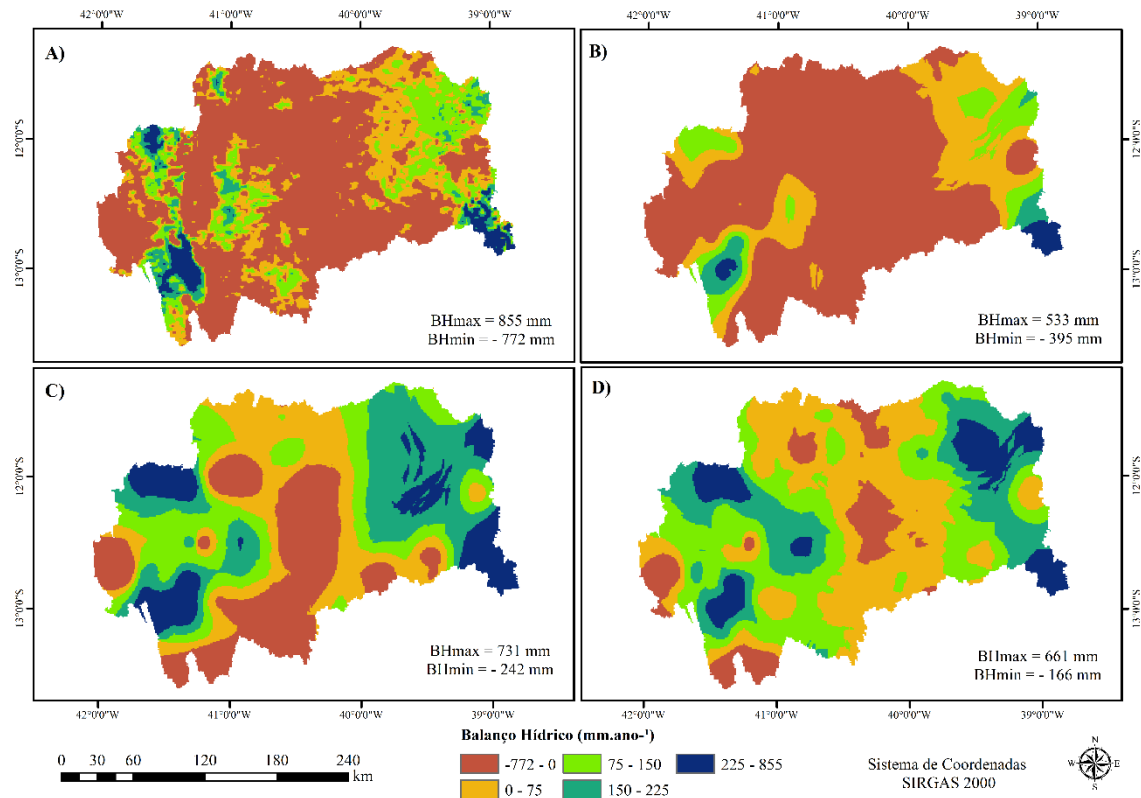


Figura 1.11 - Balço hídrico obtido com a precipitação do IDW e a ETR de diferentes produtos:  $ETR_{MOD16}$  (A),  $ETR_{MOD16rsp}$  (B),  $ETR_{GLEAM}$  (C) e  $ETR_{TC}$  (D) para a bacia hidrográica do rio Paraguaçu. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balço hídrico.

O não fechamento do BH é uma evidência que reforça as imprecisões nas estimativas geradas, comumente, com a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e constitui um desafio desse procedimento, principalmente em como dados devem ser comparados com estimativas realizadas por modelos (MOREIRA et al., 2018). Portanto, a avaliação do desempenho de uma metodologia ou produto de sensoriamento remoto deve ser realizada conjuntamente com a análise do comportamento dos processos hidrológicos da área de estudo, a fim de garantir a representatividade dos resultados.

O  $BH_{IDW_{TC}}$  (Figura 1.11 D) conduz a uma distribuição espacial similar à apresentada pelo  $BH_{IDW_{GLEAM}}$ , porém com menor percentual de áreas negativas (10,49%) e menor amplitude de variação dos valores (-166 a 661 mm ano<sup>-1</sup>). Nota-se que a tendência de ocorrência dos valores negativos também está associada à variabilidade da precipitação e à variabilidade interanual da evapotranspiração, uma vez que essas se relacionam fortemente, e em regiões como o semiárido o balço com potencial evapotranspirativo é mais ou menos atendido conforme maior ou menor ocorrência de chuvas ao longo do ano (FELIX e PAZ,

2016). Comportamento entendido por meio da relação entre a precipitação e a ETR, uma vez que quanto maior a disponibilidade de energia solar, de temperatura do ar e de velocidade do vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, ocasionando aumento na taxa de evapotranspiração (SILVA et al., 2015).

Na Figura 1.12 estão apresentados os mapas de balanço hídrico considerando a precipitação proveniente do banco de dados TerraClimate, combinada com quatro fontes distintas de evapotranspiração real ( $ETR_{MOD16}$ ,  $ETR_{MOD16rsp}$ ,  $ETR_{GLEAM}$  e  $ETR_{TC}$ ).

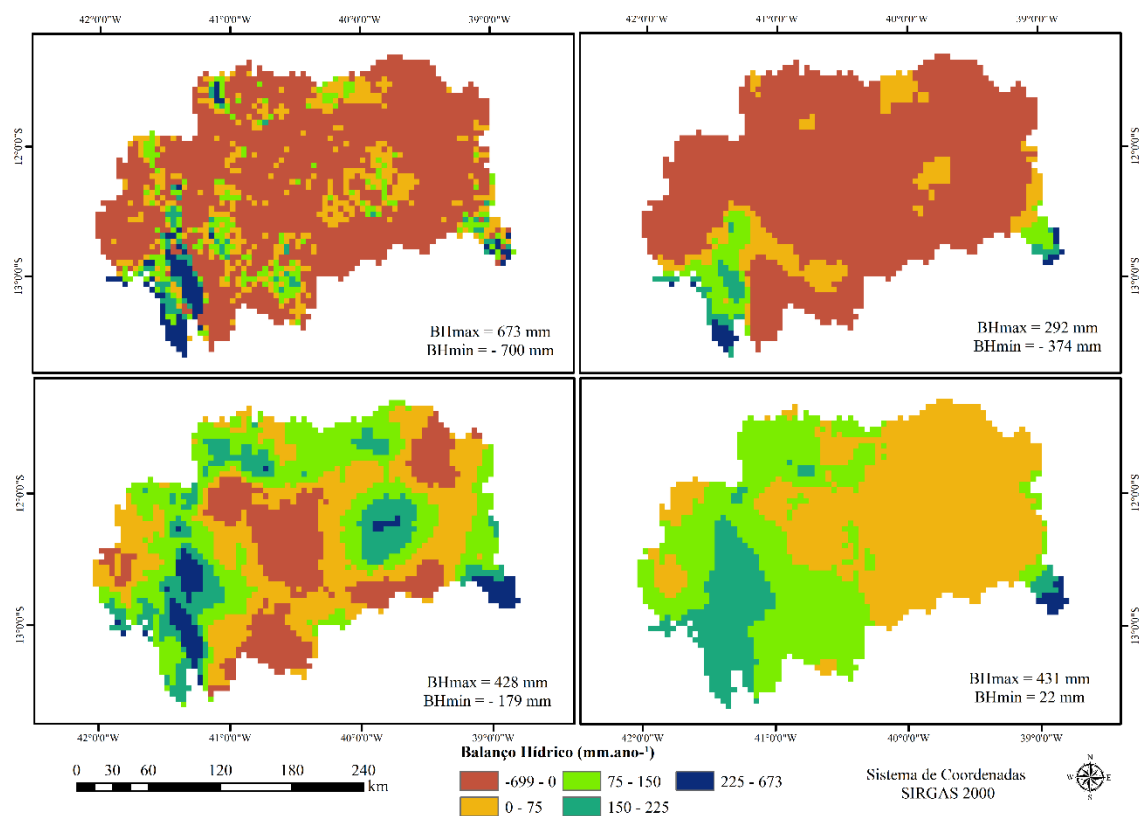


Figura 1.12 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação do TerraClimate e ETR de diferentes produtos:  $ETR_{MOD16}$  (A),  $ETR_{MOD16rsp}$  (B),  $ETR_{GLEAM}$  (C) e  $ETR_{TC}$  (D) para a bacia hidrográfica do rio Paraguai. Os valores apresentados em cada mapa (A, B, C e D) representam os limites inferior e superior de cada balanço hídrico.

Nos balanços hídricos  $BH_{TC\_MOD16}$  e  $BH_{TC\_MOD16rsp}$  (Figuras 1.12 A e B) a distribuição espacial é caracterizada, predominantemente, por áreas com valores negativos (70% e 82%, respectivamente), nota-se que a faixa de variação da amplitude do  $BH_{TC\_MOD16}$  (-700 a 673 mm ano<sup>-1</sup>) corresponde ao dobro da faixa de variação do  $BH_{TC\_MOD16rsp}$  (-374 a 292 mm ano<sup>-1</sup>). Conforme o estudo desenvolvido por Ribeiro (2020) a utilização do produto MOD16, na bacia hidrográfica do Jequitinhonha, no semiárido brasileiro, também gerou valores negativos no

balanço hídrico, fato atribuído às inconsistências do produto para regiões com baixa precipitação. Destaca-se que para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu o mesmo comportamento é observado, onde o produto MOD16 produziu valores negativos com maior extensão e magnitude em todas as combinações.

No balanço hídrico  $BH_{TC\_GLEAM}$  (Figura 1.12 C) a ocorrência dos valores negativos (22,35% da área) segue a tendência da precipitação, e se manifestam nas regiões em que essa apresenta menor magnitude. Além disso, nota-se que o  $BH_{TC\_GLEAM}$  conduz à caracterização da região influenciada pelo efeito orográfico e pelo aumento gradativo da precipitação no sentido da foz. Com relação à amplitude anual (-179 a 428 mm), o  $BH_{TC\_GLEAM}$  apresenta valores positivos mais representativos que os BH gerados pelo MOD16. Desempenho que pode estar associado à forma de cálculo da ETR pelo GLEAM (Equação de Priestley-Taylor), com pequeno número de entradas, principalmente considerando o uso de conjuntos de dados baseados em observações de satélite, de fontes diversas e bem validadas, minimizando o uso de dados modelados e parametrizações (MOREIRA et al., 2019a).

Por fim, o  $BH_{TC\_TC}$  (Figura 1.12 D) apresenta variações caracterizadas por maiores magnitudes na região oeste e comportamento suavizado no leste da bacia hidrográfica, sendo correspondente ao regime pluviométrico e representando as variações da tipologia climática da bacia (Figura 1.9). A variável  $BH_{TC\_TC}$  apresentou faixa de variação de 22 a 431  $\text{mm ano}^{-1}$  e foi a única que não gerou áreas com valores negativos, reafirmando seu melhor desempenho em relação aos demais produtos. Uma explicação para tal desempenho se deve ao fato de suas componentes (PPT e ETR) serem provenientes do banco de dados (TerraClimate), possuírem o mesmo intervalo de dados no período base e terem apresentado os melhores desempenhos na análise individualizada. Nesse sentido, corroborando com Santos (2014), o sensoriamento remoto pode contribuir para representação contínua da distribuição dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica.

De forma geral, na região semiárida as variáveis hidrológicas apresentam uma sazonalidade mais acentuada, principalmente, pela alta variabilidade da precipitação tanto no espaço como no tempo, comportamento que evidencia a necessidade de estimativas precisas para compreensão de processos e variáveis hidrológicas. Nesse contexto, destaca-se a importância de uma análise quali-quantitativa da base de referência, principalmente para a precipitação, comumente estimada a partir dos dados das estações pluviométricas. Segundo Wilcox et al., (2003), a proporção relativa de evapotranspiração sobre a precipitação define a disponibilidade de água em uma região, determina os padrões globais de vegetação e permite a obtenção de resultados que representem melhor a circulação da água na bacia hidrográfica.

A utilização do balanço hídrico para avaliação das estimativas de seus componentes agrega informações valiosas sobre o comportamento do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica. Dentre as diferentes combinações do BH, o desempenho das variáveis  $BH_{TC\_TC}$  e  $BH_{IDW\_TC}$  foram superiores. O  $BH_{IDW\_TC}$  apresentou o menor percentual de áreas com valores negativos e variações espaciais que seguem o comportamento da  $PPT_{IDW}$ . Já o  $BH_{TC\_TC}$  não registrou valores negativos no BH, sendo gerado pela combinação das imagens, do banco de dados TerraClimate, que apresentaram melhor desempenho na análise individualizada. Além disso, as variações do comportamento representados ao longo da bacia hidrográfica corroboram com o registrado na literatura, quanto as características de clima, relevo e faixas de amplitude de variação dos valores. Portanto, a variável  $BH_{TC\_TC}$  é a que melhor representa as condições de circulação de água na bacia hidrográfica do rio Paraguai.

#### 1.4 CONCLUSÃO

A consideração de variáveis que forneçam estimativas confiáveis e condizentes com o local de estudo é muito importante, visto que essas condições são imprescindíveis para o avanço no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, o presente trabalho aborda a avaliação do balanço hídrico gerado com a combinação da precipitação e evapotranspiração real oriundas de base de dados distintas, a fim de se obter a melhor representatividade dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica.

A precipitação proveniente do banco de dados TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ) conduziu à melhor discretização do comportamento espacial na bacia hidrográfica, caracterizando variações da orografia, maior umidade nas regiões próximas ao litoral e aridez do clima semiárido. Além disso, a variável  $PPT_{TC}$  apresentou o melhor desempenho estatístico, e, portanto, gerou os resultados mais representativos.

A evapotranspiração real obtida pelo banco de dados TerraClimate ( $ETR_{TC}$ ) apresentou resultados com magnitudes inferiores às precipitações e com boa distribuição espacial em cada região da bacia hidrográfica, caracterizando os diferentes biomas e variando conforme a tipologia climática, como o efeito orográfico e o semiárido.

A combinação das variáveis  $PPT_{TC}$  e  $ETR_{TC}$ , com melhor desempenho na análise individualizada, conduziu ao balanço hídrico ( $BH_{TC\_TC}$ ) mais representativo das condições de circulação da água na bacia hidrográfica, sendo a única variável que não produziu valores negativos, ou seja, que garantiu o fechamento do balanço hídrico, e que apresentou comportamento condizente com os processos hidrológicos.

## 1.5 REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.
- ABREU, M.; SOUZA, A.; LINS, T. M. P.; JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, S.; FERNANDES, W.; TORSSEN, E. Comparison and validation of TRMM satellite precipitation estimates and data observed in Mato Grosso do Sul state, Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 27, 2020.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: II recommended documentation. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 921-929, 2011.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANA. Agência Nacional das Águas. Brasil, 2001. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 15 de outubro de 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Hidroweb. Brasília, DF: ANA, 2010. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 6 dezembro 2020.
- AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, p. 29–41, 2005.
- CARELLI, L.; SANTO, S. M. Semeando águas no Paraguaçu / organizadores: Ivana R. Lamas, S471 Luciana Santa Rita, Rogério Mucugê Miranda. – Rio de Janeiro: Conservação Internacional, Brasil, 2016.
- CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 81-88, 2015.
- CIB. Conservation International Brazil. Bacia do Paraguaçu. Disponível em: <<https://www.conservation.org/brasil/onde-trabalhamos/bacia-do-paraguacu>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2020.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA PICCILLI, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo: desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados. **Simpósio de Geotecnologias no Pantanal (1.: 2006 nov. 11-15: Campo Grande, MS). Anais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2006.
- COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J. M.; HONG, S. H., FRIESEN, J.; VAN DE GIESEN, N. C.; RODGERS, C.; VLEK, P. L. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 33, n. 1-2, p. 127-140, 2008.
- EDUARDO, E. N.; MELLO, C. R. D.; VIOLA, M. R.; OWENS, P. R.; CURI, N. Hydrological simulation as subside for management of surface water resources at the Mortes River Basin. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 390-404, 2016.

- FELIX, V. de S.; PAZ, A. R. da. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **RBRH**, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.
- FILL, H. D.; SANTOS, I. dos; FERNANDES, C.; TOCZECK, A.; OLIVEIRA, M. F de. Balanço hídrico da bacia do Rio Barigui, PR. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v.9, 2005.
- FISHER, J. B.; MELTON, F.; MIDDLETON, E.; HAIN, C.; ANDERSON, M.; ALLEN, R., KILIC, A. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resources Research**, v.53, n. 4, p. 2618-2626, 2017.
- FLERCHINGER, G. N.; HANSON, C. L.; WIGHT, J. R. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed. **Water Resources Research**, v.32, p.2539-2548, 1996.
- FOX, D. G. Judging air quality model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**. American Meteorological Society. [s.l.], v. 62, n. 5, p.599-609, 1981.
- FRIEDL, M. A. Relationships among remotely sensed data, surface energy balance, and area-averaged fluxes over partially vegetated land surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 11, p. 2091-2103, 1996.
- 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, 2002.
- GADÊLHA, A. N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, 83p., 2018.
- GAO, H.; TANG, Q.; FERGUSON, C. R.; WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P. Estimating the water budget of major US river basins via remote sensing, *Int. J. Remote Sensing*, 31, 3955–3978, 2010.
- GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. Impacto das mudanças climáticas nas vazões do rio Paraguaçu – Cenário A1B de 2011 a 2040. IN: **XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Anais. João Pessoa – PB, 2012.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN S.; YAPO P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.
- HAMED, A.; KUO-LIN, H.; SOROOSH, S.; BRAITHWAITE, D. K.; KNAPP, K. R.; CECIL, L.; NELSON B. R.; OLIVIER P. Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, p. 69-83, 2015.
- HOU, A. Y.; KAKAR, R. K.; NEECK, S.; AZARBARZIN, A. A.; KUMMEROW, C. D.; KOJIMA, M.; IGUCHI, T. The global precipitation measurement mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 5, p. 701-722, 2014.

- HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; ARKIN, P.; CHANG, A.; FERRARO, R.; GRUBER, A. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 1, p. 5-20, 1997.
- INEMA. Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraguaçu. Disponível em: <http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/comites-de-bacias/comites/cbh-paraguacu/>. Acesso em: 28 de novembro de 2019.
- JANOWIAK, J. E.; GRUBER, A.; KONDRAGUNTA, C. R.; LIVEZEY, R. E.; HUFFMAN, G. J. A comparison of the NCEP–NCAR reanalysis precipitation and the GPCP rain gauge–satellite combined dataset with observational error considerations. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2960-2979, 1998.
- 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, 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**, Springer, v. 16, n. 2, p. 229–238, 2012.
- LEIVAS, J. F.; RIBEIRO, G. G.; SOUZA, M. D.; ROCHA FILHO, J. Análise comparativa entre os dados de precipitação estimados via satélite TRMM e dados observados de superfície em Manaus. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil**, v. 25, n. 30, p. 1611-1616, 2009.
- LELIS, L. C. S.; BOSQUILIA, R. W.; DUARTE, S.N. Avaliação dos dados de precipitação gerados pelos satélites GPM e TRMM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 153-163, 2018.
- LETTENMAIER, D. P.; ALSDORF, D.; DOZIER, J.; HUFFMAN, G. J.; PAN, M.; WOOD, E. F. Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 7309-7342, 2015.
- LI, Z.; LIU, W. Z.; ZHANG, X. C.; ZHENG, F. L. 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.
- LIAQAT, U. W.; CHOI, M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in korean peninsula. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 155, p. 93–104, 2017.
- LONG, D.; LONGUEVERGNE, L.; SCANLON, B.R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. **Water Resources Research**. 50, 1131–1151, 2014.
- MACEDO, M. J. H. **Aplicações de redes neurais artificiais e satélite TRMM na modelagem chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu/BA**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2013.
- MARTENS, B.; MIRALLES, D. G.; LIEVENS, H.; SCHALIE, R. van der; JEU, R. A. de; PRIETO, D. F.; BECK, H. E.; DORIGO, W.; VERHOEST, N. Glem v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. **Geoscientific Model Development**, Copernicus GmbH, v. 10, n. 5, p. 1903–1925, 2017.

- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.
- MCCABE, M. F.; RODELL, M.; ALSDORF, D. E.; MIRALLES, D. G.; UIJLENHOET, R.; WAGNER, W.; WOOD, E. F. The future of Earth observation in hydrology. **Hydrology and earth system sciences**, v. 21, n. 7, p. 3879-3914, 2017.
- MEDEIROS, Y. Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 127-136, 2003.
- 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**, v. 15, n. 2, p. 453-469, 2011.
- MOHEBZADEH, H.; FALLAH, M. Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 13, p. 389-400, 2019.
- MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L. Análise do balanço hídrico na América do Sul por sensoriamento remoto. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais** [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH], 2017.
- MOREIRA, A. A.; ADAMATTI, D. S.; RUHOFF, A. L. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto MOD16 e GLEAM em nove sítios de fluxos turbulentos do programa LBA. In: **Ciencia e natura**. Vol. 40, Special Edition: X Workshop Brasileiro de Micro meteorologia, p. 112-118, 2018.
- MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; SOUZA, V. de A.; ROCHA, H. R. da; PAIVA, R. C. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 131-147, 2019a.
- MOREIRA, A. A.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; RUHOFF, A. L.; PAIVA, R. C. Water balance based on remote sensing data in pantanal. **R. Ra'e Ga**, v. 46, n. 3, p. 20-32, 2019b.
- MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L. Evapotranspiração em bacias hidrográficas no Brasil: padrões e fatores limitantes. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (19.: 2019 abr.: Santos, SP). Anais**. São José dos Campos: INPE, 2019c.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a modis global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.
- PANDAY, P. K.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; LEFEBVRE, P.; CASTANHO, A. D de A. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 822-829, 2015.
- PEREIRA, R. G. F. A. **Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia-Brasil)**. Tese de Doutorado - Escola de Ciências, Universidade do Minho, Braga. 318p., 2010.
- 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, 2014.

- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação.** Dissertação de Mestrado, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.
- RIBEIRO, R. B. **Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica/** Tese de Doutorado – Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.
- ROUHOLAHNEJAD FREUND, E.; FAN, Y.; KIRCHNER, J. W. Global assessment of how averaging over spatial heterogeneity in precipitation and potential evapotranspiration affects modeled evapotranspiration rates. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 4, p. 1927-1938, 2020.
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. Combining TRMM and surface observation of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010.
- 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, 2013.
- SANTOS, A. S. P. **Análise de desempenho de campos de chuva pelo satélite TRMM na Paraíba, para fins de modelagem hidrológica distribuída.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 149p., 2014.
- SELUCHI, M.E.; CHAN CHOU, S.; GRAMANI, M. A case study of a winter heavy rainfall event over the Serra do Mar in Brazil. **Geofísica internacional**, v. 50, n. 1, p. 41-56, 2011.
- SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, R., ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWART, S. Balanço hídrico climatológico no Brasil. [CD ROM]. Esalq/USP–Piracicaba, 1999.
- SERRÃO, E. A. D. O.; WANZELER, R. T. S.; SANTOS, C. A. D.; GONÇALVES, L. D. J. M.; LIMA, A. M. M. D.; ROCHA, E. J. P. D. Avaliação estatística entre as estimativas de precipitação da constelação GPM com TRMM: Uma análise a bacia hidrográfica do rio Solimões. **Revista brasileira de climatologia**, v. 18, 2016.
- SHEFFIELD, J.; FERGUSON, C. R.; TROY, T. J.; WOOD, E. F.; MCCABE, M. F.: Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing, **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 7, 2009.
- SHEFFIELD, J.; FERGUSON, C. R.; TROY, T. J.; WOOD, E. F.; MCCABE, M. F. Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 7., 2009.
- SILVA, A. M. A.; OLIVEIRA, A. G.; LOEZER, T. L.; SOUZA, R. M. Avaliação do comportamento da precipitação entre o primeiro planalto paranaense e o litoral do Paraná no ano hidrológico 2010/2011. **Revista Geonorte**, Manaus, v.2, n.5, p.967-974, 2012.
- SILVA, S. F. **Análise da disponibilidade e demanda frente a cenário de mudanças climáticas.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, 2012.

- SILVA, J. N.; DA SILVA CAIADO, E.; CAIADO, M. A. C. Escolha de Parâmetro para Interpolação de Precipitação Diária Utilizando o Interpolador Inverse Distance Weight (IDW). **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves, 2013.
- SILVA, B. M. B. da; SILVA, D. D. da; MOREIRA, M. C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 3, p. 623-634, 2015.
- SIRISENA, T. A.; MASKEY, Shreedhar; RANASINGHE, Roshanka. Hydrological Model Calibration with Streamflow and Remote Sensing Based Evapotranspiration Data in a Data Poor Basin. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3768, 2020.
- SIVAPALAN, M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 15, p. 3163–3170, 2003.
- SKOFRONICK-JACKSON, G.; PETERSEN, W. A.; BERG, W.; KIDD, C.; STOCKER, E. F.; KIRSCHBAUM, D. B.; WILHEIT, T. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 8, p. 1679-1695, 2017.
- SOUSA, F.; MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. D. S.; SILVA, V O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). **Ambiência**, v. 12, n. 2, p. 707–719, 2016.
- TANAJURA, C. A. S.; GENZ, F.; ARAÚJO, H. A. de. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 345-358, 2010.
- TEODORO, T. A.; PASSOS, R. B. dos; SILVA, B. A.; SILVA, B. C da. Análise das Estimativas da precipitação diária do produto GPM-IMERG na bacia hidrográfica do rio Sapucaí, região sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, 2020.
- UNESCO - Organização as Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura. **Guia metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur**, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe, Montevideo, 1982.
- VALÉRIO, E. de L. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 872-887, 2015.
- VAN DIJK, A. I. J. M.; RENZULLO, L. J. Water resource monitoring systems and the role of satellite observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 1, p. 39-55, 2011.
- 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, 2013.
- WILCOX, B.P.; BRESHEARS, D.D.; SEYFRIED, M.S. Water balance on rangelands. **In Encyclopedia of Water Science. Encyclopedia of water science**, v. 791, p. 4, 2003.
- YANG, S.; NESBITT, S. W. Statistical properties of precipitation as observed by the TRMM precipitation radar. **Geophysical Research Letters**, v. 41, p. 5636-5643, 2014.

- ZHANG, Y.; PAN, M.; SHEFFIELD, J.; SIEMANN, A. L.; FISHER, C. K.; LIANG, M.; WOOD, E. F. A Climate Data Record (CDR) for the global terrestrial water budget: 1984–2010. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 241-263, 2018.
- ZHOU, Y.; LAU, W. K. M.; HUFFMAN, G. J. Mapping TRMM TMPA into average recurrence interval for monitoring extreme precipitation events. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 54, p. 979-995, 2015.
- ZULUAGA, M. D.; JUNIOR, R. A. H. Extreme Convection of the Near-Equatorial Americas, Africa, and Adjoining Oceans as seen by TRMM. **Monthly Weather Review**, v. 143, p. 298-316, 2015.

## 2 CAPÍTULO 2 – Aprimoramento do método de regionalização da vazão média de longa duração com a utilização de dados espaciais

### RESUMO

O processo de regionalização de vazões é fundamental para a estimativa de disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia e conseqüentemente para o planejamento e gestão de recursos hídricos, sendo frequentes os estudos que visam o aperfeiçoamento dessas técnicas. Nesse contexto, este trabalho teve o objetivo de aprimorar o processo de regionalização da vazão média de longa duração usando variáveis explicativas que considerem os processos físicos de circulação da água numa bacia hidrográfica. Para isso foram utilizadas as características: área, precipitação e evapotranspiração real. A precipitação (PPT) foi obtida por duas metodologias: PPT<sub>IDW</sub> oriunda da interpolação pelo método da ponderação do inverso do quadrado da distância (IDW) e PPT<sub>TC</sub> obtida pelo banco de dados TerraClimate. A evapotranspiração real (ETR<sub>TC</sub>) foi proveniente do banco de dados TerraClimate. A identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) foi realizada pela análise de Cluster, com os métodos de Ward e K-means, e a avaliação dos agrupamentos gerados foi realizada pela com a continuidade geográfica e com as medidas de discordância e de heterogeneidade, estatisticamente baseadas em momentos-L. A regionalização da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) foi desenvolvida considerando as variáveis explicativas: área de drenagem, vazão equivalente ao volume precipitado (Peq) e vazão equivalente ao volume precipitado menos a evapotranspiração real, na área de cada trecho da hidrografia (BH). Os modelos de regionalização de vazões obtidos foram avaliados por análises estatísticas, física e de risco. Todas as equações apresentaram bom ajuste com as variáveis, porém dentre essas, o BH<sub>IDW\_TC</sub>, proveniente da combinação da precipitação e evapotranspiração real do TerraClimate e o BH<sub>TC\_TC</sub> proveniente da combinação da precipitação e evapotranspiração real do TerraClimate se destacaram pelo desempenho superior. E com relação as análises de desempenho físico e de risco, o BH<sub>TC\_TC</sub> se sobressaiu, caracterizando a magnitude e a distribuição espacial dos valores da vazão de modo condizente com as condições climáticas e de relevo locais e sem valores negativos. Portanto, a variável explicativa BH<sub>TC\_TC</sub> conduziu ao comportamento mais representativo das condições dos processos físicos de circulação da água na bacia hidrográfica.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios em hidrologia é a análise da disponibilidade hídrica e das suas variações ao longo da hidrografia (GASQUES et al., 2018). A disponibilidade hídrica é caracterizada pelas vazões mínimas e médias (NOVAES et al., 2009) e sua estimativa é essencial para questões como manutenção da qualidade da água, irrigação e planejamento e gestão de recursos hídricos (OUYANG, 2012). Nesse sentido, a disponibilidade hídrica natural é representada pela vazão mínima (SMAKTHIN, 2001) e a vazão média de longa duração representa a disponibilidade hídrica potencial de uma bacia hidrográfica (PRUSKI e PRUSKI, 2011).

O estudo da vazão média é de suma importância para estimar as condições de fluxo que prevalecem durante o ano, permitindo a caracterização dos limites superiores (abstraindo-se as perdas por evaporação e infiltração) da disponibilidade de água de um manancial (ALEXANDRE e MARTINS, 2005; VON SPERLING, 2007; PRUSKI e PRUSKI, 2011). Para estimativa da disponibilidade hídrica são utilizadas informações de estações fluviométricas. No entanto, essas estações não contemplam toda a hidrografia (PANDEY e NGUYEN, 1999), bem como, em muitos casos, possuem limitações devido à quantidade e/ou à qualidade dos dados (SMITH et al., 2014).

Para suprir a falta de dados fluviométricos ao longo da hidrografia tem-se a alternativa de utilização da regionalização de vazões. Esse método é amplamente difundido e visa a obtenção de informações acerca da disponibilidade hídrica em áreas de drenagem não monitoradas (REGO, 2013; BESKOW et al., 2014), baseando-se na transferência de dados hidrológicos entre regiões com características físicas e climáticas semelhantes (PRUSKI et al., 2012).

Uma das técnicas de regionalização de vazões mais utilizadas é o ajuste de equações de regressão, que relacionam as informações hidrológicas de interesse com características das bacias hidrográficas (CHAVES et al., 2002; NOVAES et al., 2009; ARSENAULT e BRISSETTE, 2014; COSTA et al., 2012). Na aplicação dessa metodologia, a escolha das variáveis explicativas utilizadas nas equações de regressão possui grande influência no desempenho dos modelos de regionalização de vazões (RAZAVI e COULIBALY, 2013). Portanto, são necessárias variáveis representativas do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica (PRUSKI et al., 2013).

Com o intuito de representar as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica numa variável, Pruski et al., (2013) propuseram o uso da vazão equivalente ao volume

precipitado ( $P_{eq}$ ), que considera 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 ( $P_{eq750}$ ), definido com base no estudo de Novaes (2005). Apesar disso, afirmaram que outros valores de abstração devem ser considerados em estudos de regionalização a fim de produzir resultados satisfatórios e atender a especificidade de cada bacia hidrográfica, que possui um valor representativo da abstração da precipitação para formação das vazões.

De acordo com Rego (2013) 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 et al., 2014). Nesse contexto, Rego (2013) desenvolveu um estudo que além do emprego das variáveis explicativas área de drenagem e precipitação anual, foi considerado o uso de diferentes fatores de abstração, dentre os quais a estimativa da evapotranspiração real (ETR) no balanço hídrico se destacou como o fator abstração que conduziu aos melhores resultados na regionalização das vazões médias e mínimas.

Apesar da importância da regionalização para a implementação do conhecimento acerca do regime hidrológico espacial, existem limitações à capacidade preditiva das variáveis, uma vez que varia com diversos fatores como a topografia, clima, propriedade do solo e tipo de vegetação (MU et al., 2007). Nesse contexto, destaca-se que medições de sensoriamento remoto têm apresentado grande potencial para o fornecimento de variáveis do ciclo hidrológico, em escalas regionais e globais (ARMANIOS e FISHER, 2014; SHEFFIELD et al., 2009; WANG et al., 2014).

Uma forma de aprimoramento do processo de regionalização de vazões é a consideração de dados de entrada que caracterizem os processos de variabilidade espacial da ETR ao longo da bacia. Entretanto, ao utilizar a ETR numa região com baixo índice pluviométrico foram obtidos valores negativos no cálculo do balanço hídrico (RIBEIRO, 2020).

Na busca por dados mais representativos para o balanço hídrico, o Capítulo 1 avaliou diferentes combinações entre a precipitação e evapotranspiração real, oriundas de diferentes bases de dados numa bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. As variáveis de precipitação proveniente do interpolador de ponderação do inverso quadrado da distância (IDW) ( $PPT_{IDW}$ ) e do banco de dados TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ), obtiveram melhores desempenhos. A evapotranspiração real também proveniente do TerraClimate ( $ETR_{TC}$ ) apresentou a melhor caracterização do comportamento na bacia. Por fim, a combinação dessas variáveis produziu os balanços hídricos ( $BH_{TC\_TC}$  e  $BH_{IDW\_TC}$ ) mais representativos dos processos físicos da bacia hidrográfica, sendo que no  $BH_{TC\_TC}$  não houve valores negativos.

O aprimoramento do processo de regionalização de vazões é fundamental para produzir informações que forneçam subsídios a iniciativas diversas e que incluam melhorias de estratégias político-administrativas voltadas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas brasileiras. Portanto o objetivo desse trabalho foi aprimorar o processo de regionalização da vazão média de longa duração usando variáveis explicativas que considerem os processos físicos de circulação da água numa bacia hidrográfica.

## **2.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.2.1 Regionalização de vazões**

O processo de regionalização de vazões foi realizado pelo método de regressão regional. Esse método se baseia na definição das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) e no ajuste de equações de regressão às características físicas e/ou climáticas da bacia hidrográfica, a fim de se obter a vazão em qualquer local da área em estudo (MALEKINEZHAD et al., 2011; PRUSKI et al., 2013; VEZZA et al., 2010).

Na Figura 2.1 é apresentado o fluxograma contendo as etapas abordadas na regionalização da vazão média de longa duração.

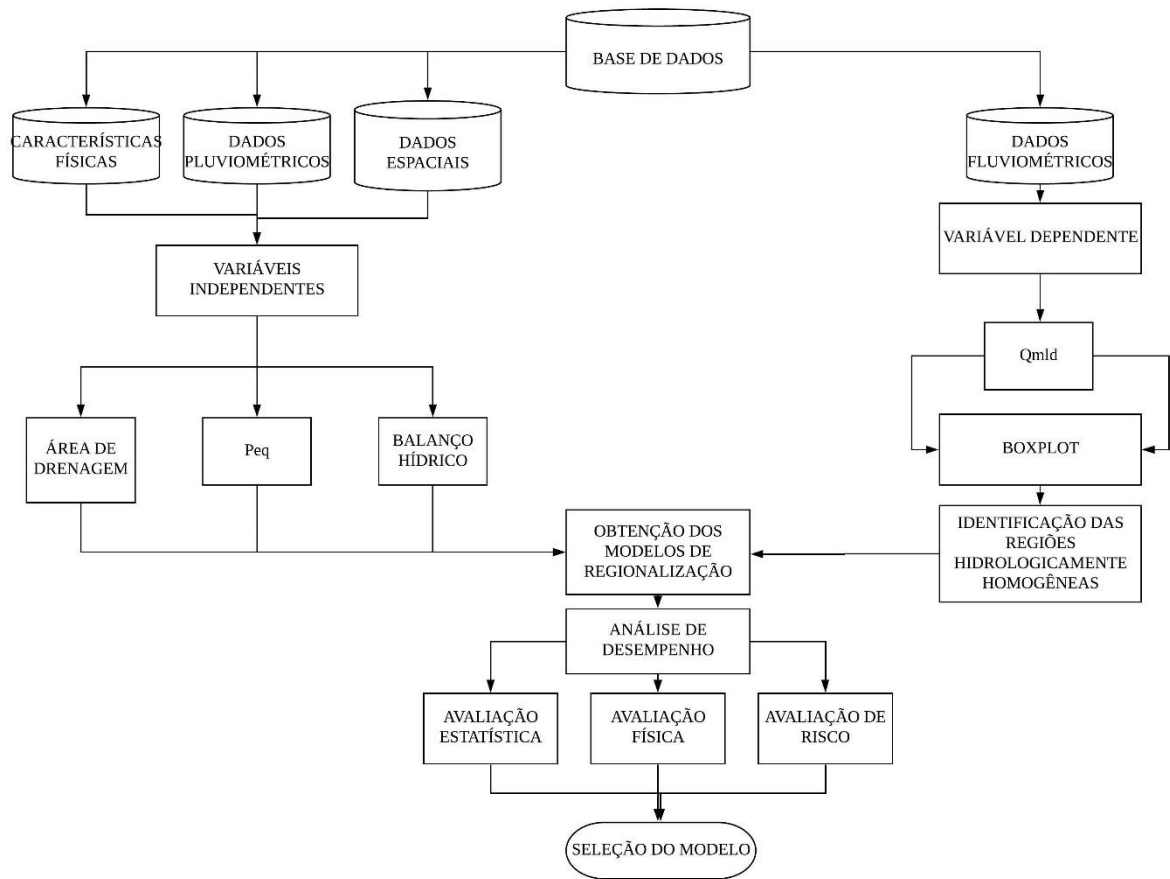


Figura 2.1 - Fluxograma das etapas da regionalização da vazão média.

### 2.2.2 Base de dados

Para composição da base de dados foram utilizadas séries históricas, medidas em postos fluviométricos e pluviométricos, adquiridas no site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e dados de precipitação e evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate, ambos em escala mensal.

O período base foi definido com intervalo de 20 anos, sendo composto pelas estações que continham pelo menos 95% dos dados anuais. Foram selecionadas estações pluviométricas dentro da bacia hidrográfica e ao seu entorno, de modo que permitisse melhor cobertura e representatividade na espacialização da precipitação.

### 2.2.3 Variáveis independentes

Com a finalidade de avaliar o desempenho de variáveis mais explicativas no processo de formação das vazões, foram selecionadas variáveis independentes que representassem as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

Como consideração dos aspectos físicos da bacia hidrográfica foi utilizada a área de drenagem (A), já que essa é a característica física que mais interfere no processo de formação das vazões médias e mínimas (RIBEIRO et al., 2005).

Para representar as características climáticas foi utilizada a precipitação média anual, visto que o seu comportamento apresenta ligação com o regime de manutenção das vazões específicas e sua inserção tende a melhorar o modelo de regionalização (PRUSKI et al., 2012), comportamento verificado por Rodriguez (2008) no estudo de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Paracatu-MG.

Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, considera-se que esta não reflita efetivamente a contribuição para a formação destas vazões, pois parte do total de água precipitada é transferida de volta para a atmosfera por meio da evapotranspiração, sendo o principal fator da abstração inicial do processo de formação de vazões (OLIVEIRA et al., 2013; REGO, 2013).

Para obtenção do melhor ajuste nas equações de regionalização foram utilizadas as variáveis independentes: área de drenagem (A); área de drenagem combinada com a precipitação média anual, por meio da vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem (Peq) (Equação 1); e o balanço hídrico (BH), em que a vazão é equivalente ao volume precipitado menos o fator de abstração atribuído à estimativa da evapotranspiração real para cada sub-bacia (ETR) (Equação 2). As equações usadas para calcular as variáveis independentes, citadas anteriormente, são expressas a seguir:

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

$$BH = \frac{(P-ETR) A}{k} \quad (2)$$

em que: P = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm ano<sup>-1</sup>; A = área de drenagem, km<sup>2</sup>; ETR = evapotranspiração real anual em cada trecho da hidrografia, mm ano<sup>-1</sup>; k = fator de conversão de unidades, o qual é igual a 31.536; Peq = vazão equivalente ao volume

precipitado na área de drenagem considerada,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ;  $\text{BH}$  = vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

### 2.2.3.1 Área de drenagem

A área de drenagem da bacia hidrográfica foi obtida por meio do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 m, disponível na plataforma <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Posteriormente, no software Arcgis 10.5, foi realizado o preenchimento de depressões espúrias na imagem para obtenção do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDEHC).

### 2.2.3.2 Precipitação

As variáveis relacionadas à precipitação foram divididas conforme a fonte de obtenção, sendo a  $\text{PPT}_{\text{IDW}}$  oriunda da interpolação por IDW, com resolução de  $\sim 1$  km, e a  $\text{PPT}_{\text{TC}}$  do banco de dados TerraClimate ( $\sim 4$  km). Cada variável de precipitação foi combinada à área de drenagem de cada sub-bacia para composição das variáveis explicativas  $\text{Peq}_{\text{IDW}}$  e  $\text{Peq}_{\text{TC}}$  (Equação 1).

### 2.2.3.3 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ETR) foi obtida por meio do banco de dados TerraClimate ( $\text{ETR}_{\text{TC}}$ ), cujos dados são calculados por meio do modelo de balanço hídrico climático de Thornthwaite-Mather modificado, com resolução temporal mensal e resolução espacial de  $1/24^\circ$  ( $\sim 4$  km) (ABATZOGLOU et al., 2018).

### 2.2.3.4 Balanço Hídrico

Os balanços hídricos ( $\text{BH}_{\text{IDW}_{\text{TC}}}$  e  $\text{BH}_{\text{TC}_{\text{TC}}}$ ) foram obtidos com base na combinação das variáveis de precipitação ( $\text{PPT}_{\text{IDW}}$  e  $\text{PPT}_{\text{TC}}$ ) e evapotranspiração real ( $\text{ETR}_{\text{TC}}$ ) (Equação 2) que apresentaram melhores desempenhos quanto à representatividade do comportamento físico e climático da bacia hidrográfica no estudo realizado no Capítulo 1.

Para fins de utilização da variável  $\text{BH}_{\text{IDW}_{\text{TC}}}$  na regionalização de vazões, optou-se pela anulação dos valores negativos gerados no balanço hídrico, visto que sua utilização poderia gerar valores negativos de vazão, cujo comportamento é hidrológicamente improvável.

## 2.2.4 Variáveis dependentes

A variável dependente utilizada na regionalização foi a vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ). A definição dessa variável pautou-se na sua importância para a área de estudo, uma vez que a  $Q_{mld}$  representa a disponibilidade potencial da vazão na bacia hidrográfica e é referência para outorgas sob condições de regularização.

A obtenção da variável dependente foi realizada para cada estação fluviométrica, considerando o descarte dos anos com falhas superiores a 5%, por meio do software livre Hydrology Plus - Sistema Computacional para Estudos Meteorológicos e Hidrológicos (SOUSA, 2017).

### 2.2.4.1 Identificação de outliers – Boxplot

Para identificação dos dados que possuíam comportamento inconsistente ao longo da série histórica, utilizou-se a representação dos parâmetros estatísticos por meio do boxplot. Esse, por sua vez, é um tipo de gráfico usado regularmente na pesquisa científica e a sua construção é viabilizada por meio da utilização de softwares estatísticos. Desse modo, é possível mostrar a tendência central não-paramétrica (mediana), dispersão (quartis 25% e 75%), a forma de distribuição ou simetria da amostra (valores pontuais mínimo e máximo), os valores atípicos (outliers) e extremos (NETO et al., 2017).

O boxplot foi aplicado aos dados das estações fluviométricas utilizando os valores do coeficiente de escoamento (Equação 3), para a  $Q_{mld}$ .

$$CE = \frac{Q_{mld}}{Peq} \quad (3)$$

em que: CE = coeficiente de escoamento,  $Q_{mld}$  = vazão média de longa duração,  $Peq$  = vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem.

Considerando a precipitação obtida a partir de duas metodologias distintas ( $PPT_{IDW}$  e  $PPT_{TC}$ ), o coeficiente de escoamento (CE) foi caracterizado conforme a forma de obtenção da precipitação, em  $CE_{IDW}$  e  $CE_{TC}$ .

De acordo com as definições apresentadas anteriormente, destaca-se que o gráfico boxplot tem formato de caixa, e divide-se com base em cinco valores: limite inferior, primeiro

quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e limite superior. Nas equações 4 e 5, são especificados os limites inferior ( $L_I$ ) e superior ( $L_S$ ) que delimitam o intervalo para o conjunto de dados, permitindo também a identificação dos valores que se encontram fora desse intervalo, denominados outliers.

$$L_I = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

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

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.

Para identificar se dentre os valores analisados existem outliers extremos, dados que apresentam discrepância superior ao limite estabelecido pelo outliers, foi realizada a verificação por meio das Equações 6 e 7, que caracterizam os seus limites e possibilitam a percepção da sua ocorrência.

$$LE_I = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1) \quad (6)$$

$$LE_S = Q_3 + 3 (Q_3 - Q_1) \quad (7)$$

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.

#### **2.2.4.2 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas**

A identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) foi realizada por meio do método da análise de cluster, com base nas características do local. Essa metodologia se destaca por ser muito utilizada e recomendada na literatura (HOSKING e WALLIS, 2005; NAGHETTINI e PINTO, 2007; DINIZ et al., 2012), de modo a permitir a transformação do dado coletado em cada estação fluviométrica, numa informação relacionada com maior área de alcance.

De acordo com Nathan e McMahon, (1990), as principais dificuldades da análise de cluster apresentam relação com a escolha da medida de dissimilaridade, com o método de aglomeração e com as variáveis a serem utilizadas. Assim, é válido ressaltar que a subjetividade das escolhas pode interferir nos resultados que serão obtidos (RIBEIRO, 2016).

Para determinação da medida de dissimilaridade foi aplicada a distância Euclidiana generalizada (Equação 8), uma vez que é a medida mais comumente utilizada e que consiste na distância geométrica tomada em um espaço de  $p$  dimensões (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$D_{xy} = \sqrt{\sum_{l=1}^p (Z_{xl} - Z_{yl})^2} \quad (8)$$

em que:  $D_{xy}$  = distância Euclidiana entre dois indivíduos  $x$  e  $y$ ;  $Z_x$  = característica relacionada ao indivíduo  $x$ ;  $Z_y$  = característica relacionada ao indivíduo  $y$ .

As variáveis utilizadas na análise de cluster foram divididas em estatísticas locais e características locais (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Com a finalidade de obter regiões geograficamente contínuas foram utilizadas as variáveis latitude e longitude, obtidas a partir de informações pontuais (RAO e SRINIVAS, 2006), e a vazão média mensal ( $Q_{mld}$ ). 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 9:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (9)$$

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  $x$ .

Para análise de cluster das estações fluviométricas foi utilizado o método hierárquico desenvolvido por Ward em 1963 e o método não hierárquico K-means Hartigan (1975). O método hierárquico de Ward, é considerado eficiente, e envolve a análise de variância para determinar as distâncias entre clusters, aglomerando-os a cada nova iteração e minimizando a soma dos quadrados de quaisquer pares de dois clusters hipotéticos. Já o método K-means, também muito empregado, move os indivíduos iterativamente de um cluster para outro de forma a minimizar a variabilidade intra-cluster e maximizar a variabilidade entre os clusters

(NAGHETTINI e PINTO 2007). A rotina de trabalho relativo à análise de cluster foi implementada no software R com auxílio dos pacotes 'DAAG' e 'ClusterCrit'.

### **2.2.4.3 Avaliação dos agrupamentos**

Para avaliar os agrupamentos gerados na análise de cluster, verificou-se a relação desses com a continuidade geográfica, com as medidas de discordância e de heterogeneidade, estatisticamente baseadas em momentos-L.

A utilização da medida de discordância, denotada por H, definida em termos de momentos-L, visa identificar as estações fluviométricas com comportamento estatístico discrepante dos valores do cluster, comparando a variabilidade amostral observada com uma variabilidade esperada. Apesar disso, a homogeneidade de uma região deve ser baseada, sobretudo, em suas características de uniformidade física ou geográfica, e não apenas nos valores de H (HOSKING e WALLIS, 1997). A região é considerada “aceitavelmente homogênea” se  $H < 1$ , “possivelmente heterogênea” se  $1 < H < 2$ , e, “definitivamente heterogênea”, se  $H > 2$ .

### **2.2.4.4 Obtenção dos modelos de regionalização de vazão**

De acordo com Naghettini e Pinto (2007) independentemente do tipo de função empregada, o modelo de regionalização de vazão ideal é aquele com o menor número de variáveis explicativas e que apresenta pequeno erro padrão de estimativa com alto coeficiente de determinação.

Considerando a definição das variáveis dependentes e independentes e a identificação das regiões homogêneas, utilizou-se o programa Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV 1.0) desenvolvido por Sousa (2009), para obtenção dos parâmetros que compõem a equação de regressão.

Tendo em vista a avaliação dos resultados obtidos através do programa, foi realizada a análise do ajuste, conforme as premissas de Naghettini e Pinto (2007), e aplicação ao modelo de regressão potencial. Ressalta-se que esse modelo de regressão também apresentou melhor representação para regionalização em outros estudos (RAZAVI e COULIBALY, 2013; GPRH, 2012; PANDEY e NGUYEN, 1999;). Assim, a equação de regionalização das vazões para o modelo potencial é representada pela seguinte equação:

$$Q = \alpha A^a B^b C^c \dots M^m \quad (10)$$

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

### 2.2.5 Análise de desempenho

A análise de desempenho foi realizada para avaliar, dentre as equações oriundas das variáveis explicativas, àquela que produziu a condição mais representativa do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Desse modo, essa análise foi realizada a partir de três componentes: estatística, física e de risco.

#### 2.2.5.1 Análise estatística

Os parâmetros utilizados análise do desempenho estatístico das variáveis explicativas foram: a raiz quadrada do erro quadrático médio RMSE (Equação 11), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ) (Equação 12), o índice de eficiência de Nash Sutcliffe, na sua forma original (NSE) (Equação 13) e modificada (mNSE) (Equação 14), o erro médio absoluto (MAE) (Equação 15), o erro padrão ( $se$ ) (Equação 16) e o PBIAS representado pela Equação 17.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (E_i - O_i)^2} \quad (11)$$

$$R^2_{ajust} = R^2 - \frac{1}{(n-2)}(1-R^2) \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$mNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^j}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^j}, \text{ com } j \in \mathbb{N} \quad (14)$$

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (15)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n-2}} \quad (16)$$

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i) 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (17)$$

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;  $j = \epsilon$  é o expoente do NSE modificado, sendo adotado igual a 1.

De acordo com Wilks (2006), o RMSE (Equação 11) permite expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar os valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Valores de RMSE iguais a 0 indicam ajuste perfeito.

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajust}}$ ), descrito na Equação 12, descreve a proporção da variância nos dados medidos explicada pelo modelo, variando de 0 a 1. Dessa forma, os valores mais altos indicam menor variância de erro e, normalmente, valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis (SANTHI et al., 2001; VAN LIEW et al., 2003).

A aplicação do índice de Nash e Sutcliffe (Equação 13) é muito difundida para análise de modelos hidrológicos. O índice varia entre  $-\infty$  a 1, sendo que valores próximos a 1 indicam um ajuste ótimo e, que valores menores que 0 indicam que a média dos valores observados é um melhor preditor que o modelo. De acordo com Moriasi et al., (2007), o desempenho de modelos é considerado muito bom no intervalo  $0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$ ; bom no intervalo  $0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$ ; satisfatório no intervalo  $0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$  e insatisfatório caso apresente valores menores ou iguais a 0,50.

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 14 (KRAUSE et al., 2005).

A Média dos Erros Absolutos (MAE), conforme a Equação 15, é menos afetada por pontos com valores extremos (outliers), e é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981). Valores das medidas de erro iguais a 0 indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al., 2007).

O erro padrão da estimativa ( $Se$ ) (Equação 16) é um desvio padrão condicional, na medida em que indica o desvio padrão da variável dependente, dado um valor específico da variável independente. Assim, da mesma forma que o MAE, medidas de erro iguais a 0 indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al., 2007).

O enviesamento percentual (PBIAS), expresso na Equação 17, mede a tendência média dos dados estimados de serem maiores ou menores do que os dados observados (GUPTA et al., 1999), ou seja, valores positivos indicam que o modelo está superestimando enquanto negativo indica que está subestimando, se considerarmos o valor estimado menos o observado.

Por fim, para verificar se os melhores resultados obtidos por meio dos índices estatísticos, poderiam ser considerados semelhantes estatisticamente, foi aplicado o teste paramétrico *t-Student*. Para isso, definiu-se a hipótese nula considerando que os índices estatísticos obtidos por diferentes modelos são semelhantes entre si.

#### **2.2.5.2 Análise física**

A análise do comportamento físico das equações foi realizada por meio da espacialização dos valores de vazão ao longo da hidrografia. Em virtude da variação na magnitude dos valores das vazões absolutas, utilizou-se a distribuição espacial do coeficiente de escoamento (CE) para representar a  $Q_{mld}$ . A partir desse procedimento, realizou-se a avaliação dos valores do CE considerando a tendência do comportamento apresentado nos mapas da precipitação e do balanço hídrico e os valores medidos nas estações fluviométricas.

Para a espacialização das vazões regionalizadas para cada trecho do curso d'água foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 (versão 1.3 de 22/07/2017), na escala 1:100.000 e a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO), versão 2012, na escala de 1:1.000.000 disponibilizadas no portal de metadados da ANA.

#### **2.2.5.3 Análise de risco**

A análise de risco foi realizada com base na verificação do comportamento da vazão estimada pelas equações e espacializada ao longo da hidrografia. De acordo com a metodologia proposta por Rego (2013), foram estabelecidas classes baseadas nos limites físicos para os valores do CE (Tabela 2.1), com o objetivo de localizar trechos onde a vazão estimada pelo modelo supera ou subestima os limites físicos pré-estabelecidos.

Os valores estimados superiores ao maior valor observado são aceitáveis por serem fisicamente possíveis, principalmente em regiões de cabeceira, onde existe tendência de crescimento do coeficiente de escoamento. No entanto, esses locais tornam-se um problema do ponto de vista do planejamento e da gestão dos recursos hídricos, pois geram um potencial de superestimativa sobre a disponibilidade hídrica e não representam o comportamento real da hidrografia.

Os valores compreendidos entre os limites máximo e mínimo observados nas estações fluviométricas são prováveis de ocorrer, visto que esse intervalo é confiável para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

Os valores estimados inferiores ao valor mínimo observado nas estações fluviométricas são fisicamente possíveis e fornecem maior segurança para o planejamento e a gestão de recursos hídricos, por produzirem maior restrição com a subestimativa da vazão analisada.

No caso das vazões médias de longa duração, o limite físico estabelecido foi o maior coeficiente de escoamento correspondente às estações fluviométricas utilizadas no estudo. Considerando a precipitação como única entrada de água na bacia hidrográfica, 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.

Tabela 2.1 - Intervalos utilizados para a análise de frequência das vazões regionalizadas

CE	Classificação
$CE_{est} > CE_{m\acute{a}x\_obs}$	Aceitável - Potencial de superestimava
$CE_{m\acute{m}n\_obs} < CE_{est} < CE_{m\acute{a}x\_obs}$	Provável – Confiável
$CE_{est} < CE_{m\acute{m}n\_obs}$	Aceitável - Potencial de subestimativa

Fonte: REGO (2013).

em que: CE = coeficiente de escoamento;  $CE_{est}$  = CE estimado considerando as equações em análise;  $CE_{m\acute{a}x\_obs}$  = CE máximo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo;  $CE_{m\acute{m}n\_obs}$  = CE mínimo observado entre as estações fluviométricas da região em estudo.

### 2.2.6 Estudo de caso

Os procedimentos metodológicos foram aplicados para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, no estado da Bahia, que possui grande importância no contexto nacional e regional nos aspectos sociais e político-econômicos, principalmente no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos.

### 2.2.6.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu está localizada no estado da Bahia, entre os paralelos 11°11'S e 13°42'S e meridianos 38°48'W e 42°01'W, ocupa área de 54.877 km<sup>2</sup>, e é a mais importante do estado, responsável pelo abastecimento de 60% da população da região metropolitana de Salvador, que atualmente é a quarta maior cidade do Brasil (CARELLI e SANTO, 2016; CIB, 2020).

Conforme a classificação de Köppen a maior parte da área central da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, está inserida no semiárido, que é caracterizado por altas temperaturas e alta variabilidade espacial da precipitação. Na parte superior da bacia e na porção da região da Chapada Diamantina o varia de clima sub úmido a seco (Aw). E o clima úmido a sub úmido (Af), ocorre no terço inferior da bacia do rio Paraguaçu, como as regiões costeiras, em que a pluviometria alcança 1600 mm ou mais, anualmente, já a região nordeste da bacia, tem precipitação anual média inferior a 400 mm (MEDEIROS, 2003) e a evapotranspiração é bastante elevada (GENZ et al., 2012; CARELLI e SANTO, 2016).

A geologia da área é dominada por rochas do período pré-cambriano (granito, granulitos e biotita-gnais), os solos são rasos ou de profundidade média, imperfeitamente drenados, arenosos, no horizonte A e argilosos no horizonte B e o relevo varia do plano ao montanhoso com restrições para agricultura (MEDEIROS, 2003).

O rio Paraguaçu nasce nas proximidades do município de Barra de Estiva (BA), numa altitude de aproximadamente 1.200 m, e percorre cerca de 500 km até sua foz (SOUSA et al., 2016). Mediante à sua extensão, o rio Paraguaçu foi dividido em três partes: Alto Paraguaçu, trecho a montante da confluência do rio Santo Antônio; Médio Paraguaçu entre a foz do Santo Antônio e a barragem de Pedra do Cavalo e Baixo Paraguaçu, trecho a jusante dessa barragem (ANA, 2010).

Dentre os usos consuntivos, aqueles que mais demandam águas do rio Paraguaçu são: a irrigação, principalmente aquelas dos reservatórios de Apertado e Bandeira de Melo, e abastecimento humano, especialmente o sistema de abastecimento de água de Salvador (SILVA, 2012). Na Figura 2.2 é apresentado o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, no estado da Bahia.

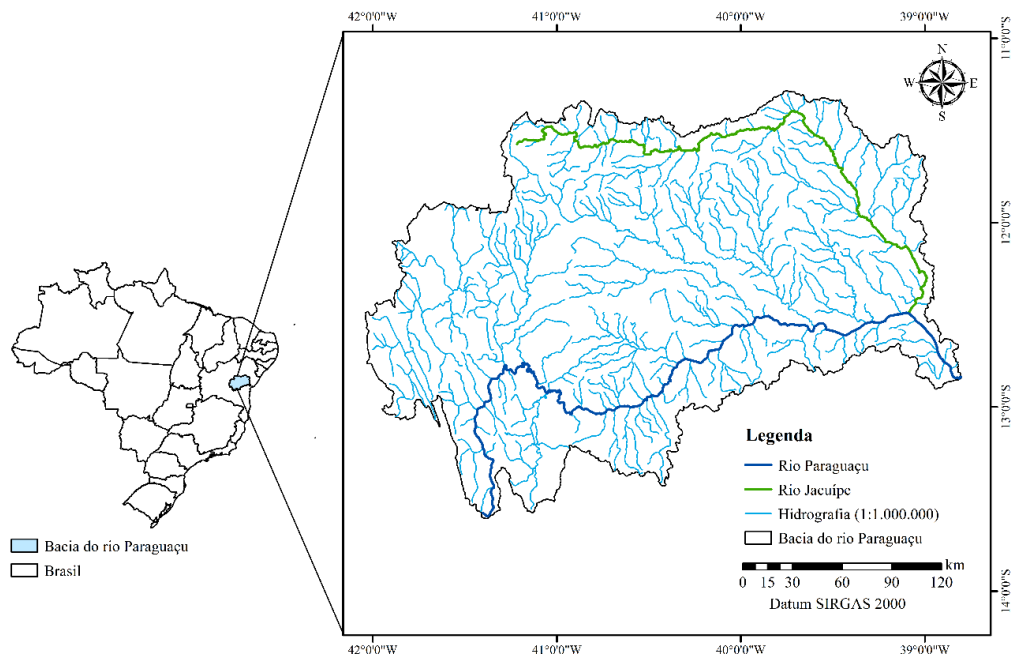


Figura 2.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

De acordo com a disponibilidade de dados consistidos nas estações fluviométricas, definiu-se o ano de 2013 como o limite para esse estudo. Portanto, o período base foi caracterizado entre os anos de 1972 e 2013, sendo composto pelo período com maior quantidade de estações com o mesmo intervalo de dados disponíveis, considerando até 5% de falhas anuais.

Foram utilizados dados de 14 estações fluviométricas (Figura 2.3) e 41 pluviométricas (Figura 2.4), com o período base 1972 a 2013. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2020. 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 A1 e A2, respectivamente.

O mapa com a espacialização das estações fluviométricas, na bacia do rio Paraguaçu, está apresentado na Figura 2.3, respectivamente.

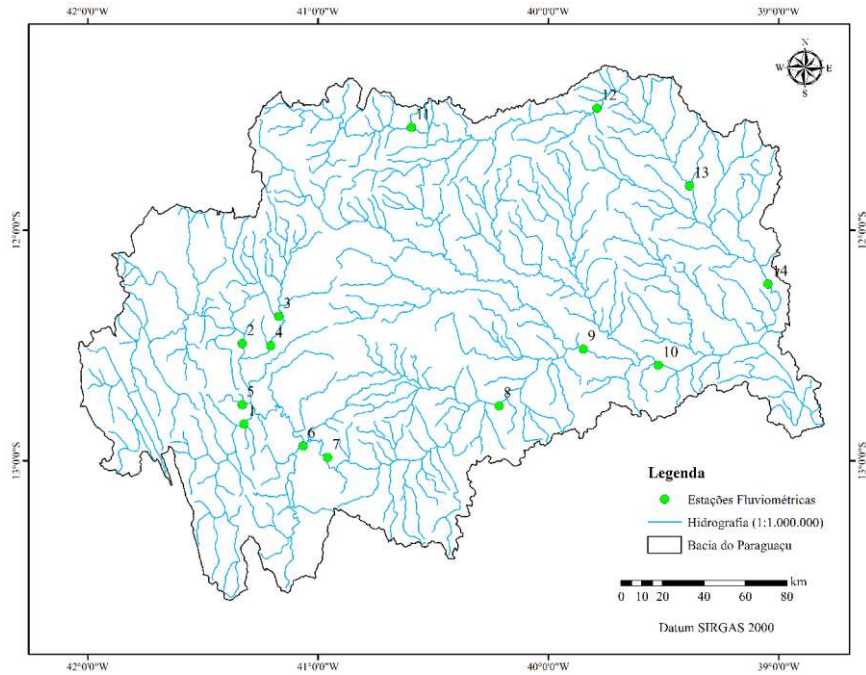


Figura 2.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 2.4 é apresentado o mapa com a espacialização das estações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

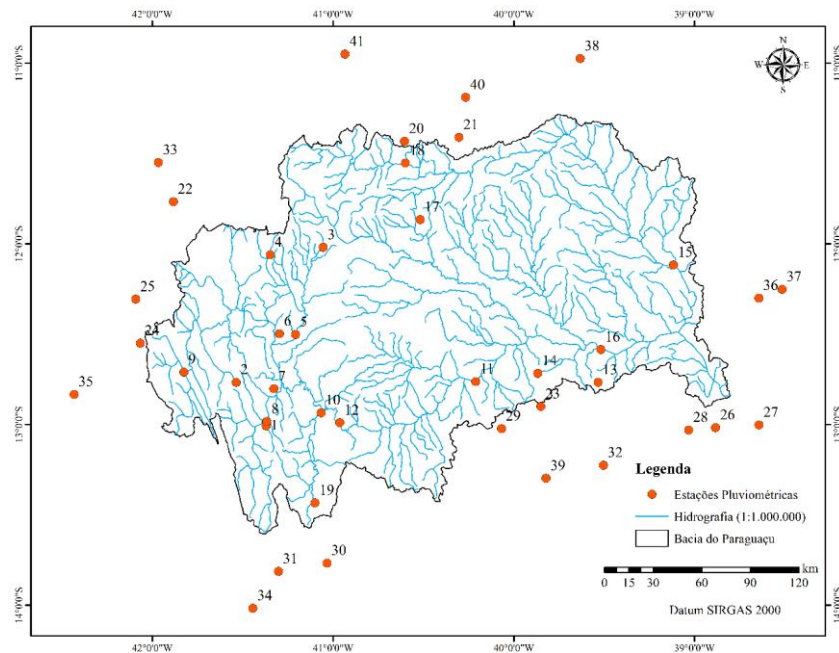


Figura 2.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 2.5 é apresentado o mapa com a classificação dos rios ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

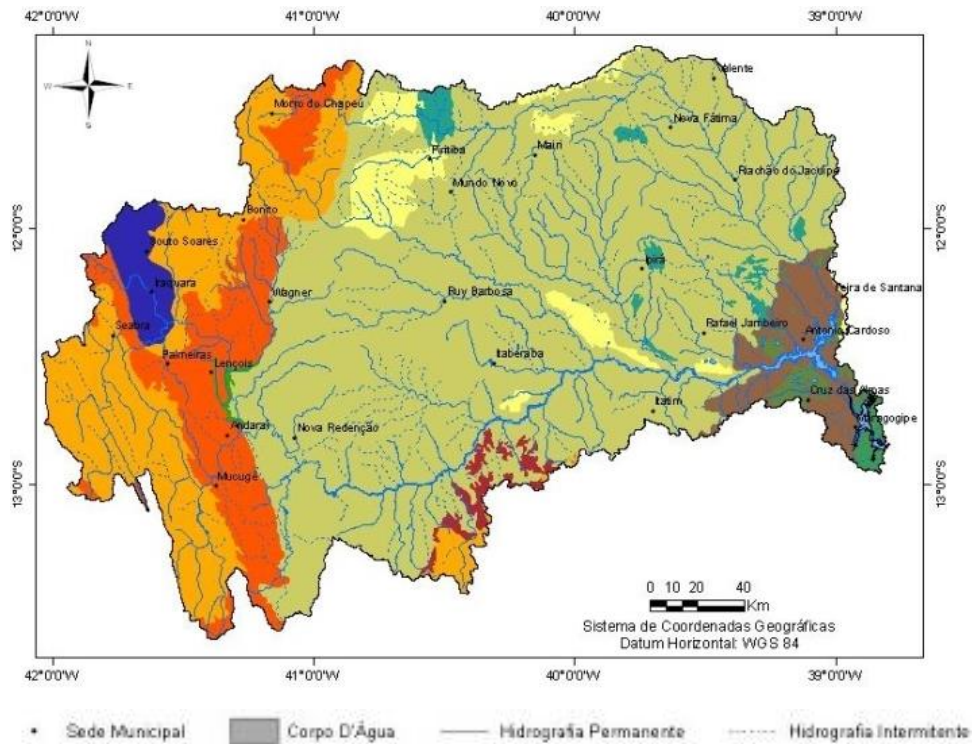


Figura 2.5 - Classificação dos rios ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Fonte: Adaptado de BAHIA (2003) apud Gonçalves (2014).

Na sequência são apresentados os mapas referentes à espacialização dos dados das variáveis precipitação, ETR e balanço hídrico aplicados nesse estudo. Na Figura 2.6 estão apresentados os mapas de precipitação provenientes dos dados medidos nas estações pluviométricas e interpolados pelo IDW (1972-2013) e do banco de dados TerraClimate (1972-2013).

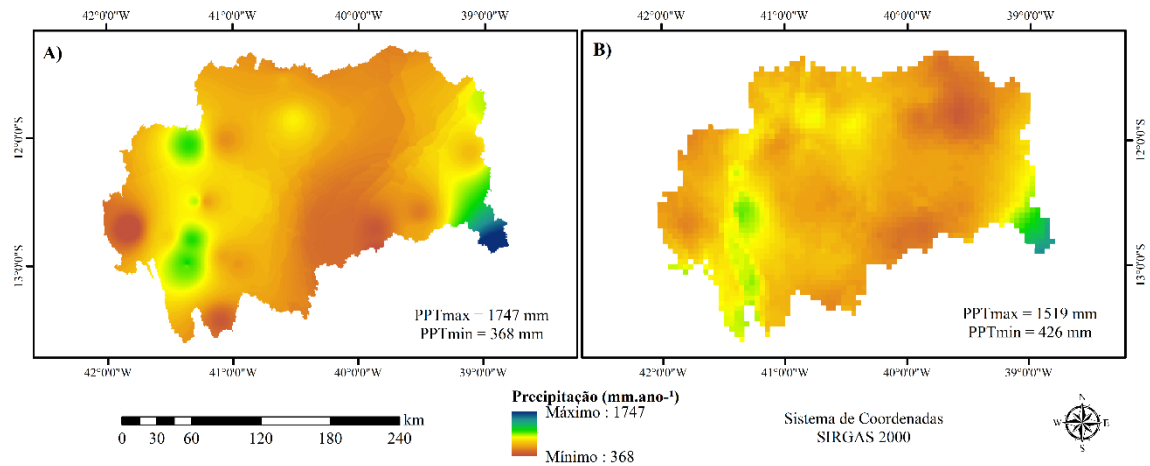


Figura 2.6 - Mapas de precipitação obtidos pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B) para bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 2.7 é apresentado o mapa da evapotranspiração real proveniente do banco de dados TerraClimate (1972-2013).

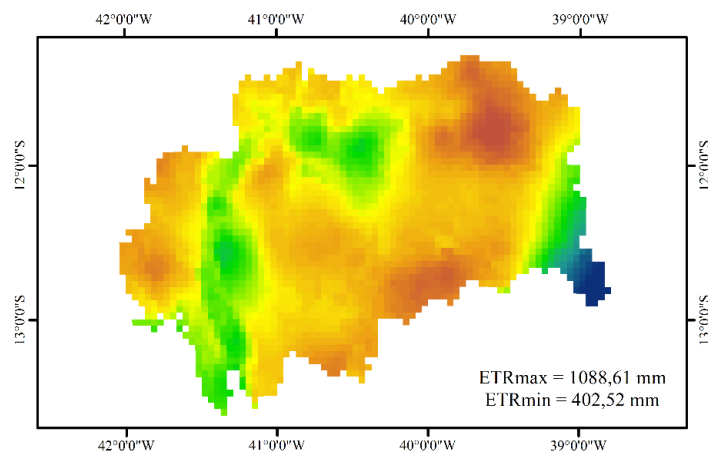


Figura 2.7 - Mapa de ETR oriunda do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 2.8 estão apresentados os mapas dos balanços hídricos (BH) considerando a precipitação proveniente dos dados interpolados por IDW e do banco de dados TerraClimate, combinadas à evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate ( $ETR_{TC}$ ).

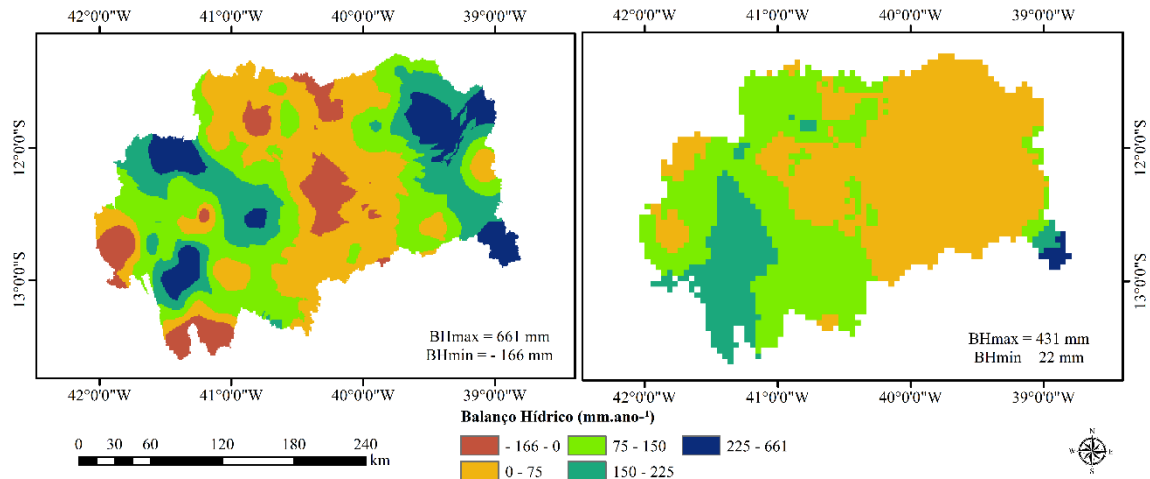


Figura 2.8 - Balanço hídrico oriundos da combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguçu.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Variáveis dependentes

Na Tabela 2.2 estão apresentados os códigos, as áreas de drenagem, as vazões médias de longa duração ( $Q_{mld}$ ), os CE obtidos com o uso da precipitação interpolada por IDW ( $CE_{IDW}$ ) e os CE obtidos pelo uso da precipitação obtida pelo banco de dados TerraClimate ( $CE_{TC}$ ) para a bacia hidrográfica do rio Paraguçu.

Tabela 2.2 - ID, Código, Área de drenagem,  $Q_{mld}$ ,  $CE_{IDW}$  e  $CE_{TC}$  para as estações fluviométricas consideradas na bacia hidrográfica do rio Paraguçu

ID	Código	Área	$Q_{mld}$	$CE_{IDW}$	$CE_{TC}$
		(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	adm	adm
1	51120000	2354,746	17,955	0,276	0,265
2	51140000	6179,805	11,087	0,077	0,078
3	51166000	734,099	1,492	0,067	0,076
4	51170000	2709,996	3,625	0,051	0,056
5	51190000	9693,716	27,639	0,117	0,119
6	51230000	2125,78	15,023	0,311	0,278
7	51240000	16513,501	59,726	0,145	0,143
8	51280000	22799,752	61,478	0,112	0,112
9	51330000	32024,385	60,52	0,081	0,080

Tabela 2.2 - ID, Código, Área de drenagem,  $Q_{mld}$ ,  $CE_{IDW}$  e  $CE_{TC}$  para as estações fluviométricas consideradas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Continuação)

ID	Código	Área	$Q_{mld}$	$CE_{IDW}$	$CE_{TC}$
		(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	adm	adm
10	51350000	37874,146	65,32	0,075	0,074
11	51410000	2069,678	2,38	0,052	0,048
12	51430000	5046,686	1,727	0,016	0,015
13	51440000	7124,284	3,863	0,025	0,025
14	51460000	11424,464	9,547	0,036	0,040

Com a aplicação do boxplot (Figura 2.9) notou-se que as estações fluviométricas 51120000 e 51230000 apresentaram valores do CE muito discrepantes em relação às demais, sendo caracterizadas como outliers superiores. Comportamento que, em ambos os casos, relaciona-se com alto valor da  $Q_{mld}$  em áreas de drenagem com baixo valor de precipitação, em função disso esses outliers foram excluídos das análises posteriores.

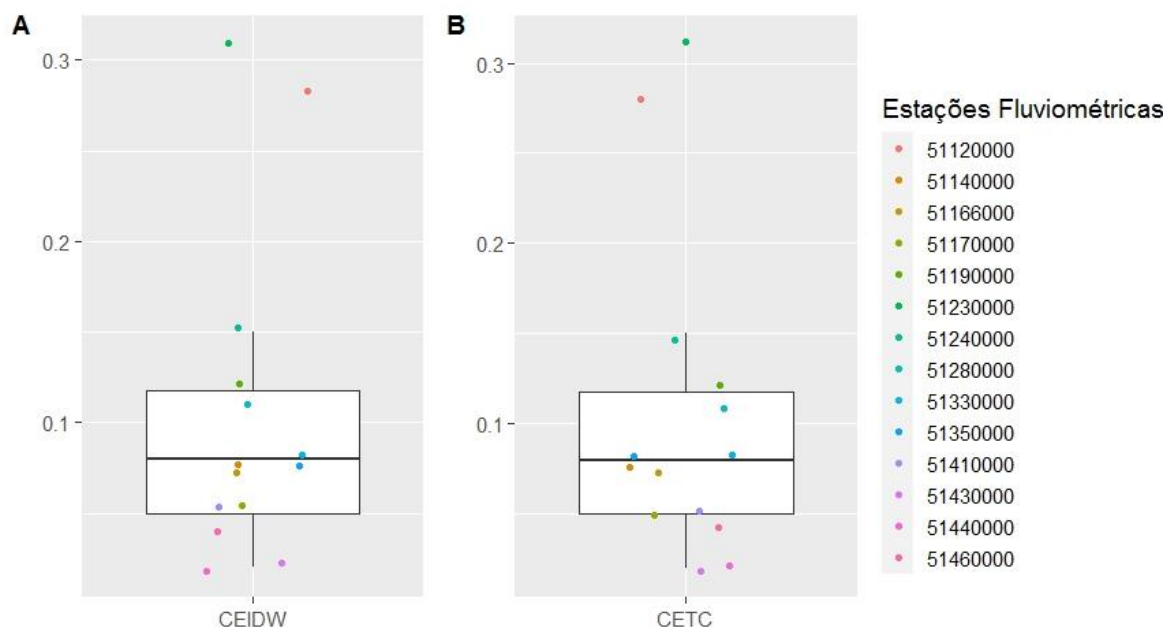


Figura 2.9 - Boxplot do A)  $CE_{IDW}$  e B)  $CE_{TC}$  para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

De acordo com a Tabela 2.2, nota-se que a menor área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu é 734,10 km<sup>2</sup>, evidenciando a limitação na obtenção de informações em posições na hidrografia com pequenas áreas de drenagem.

Os valores mínimos e máximos do CE obtidos a partir da observação nas estações fluviométricas (Figura 2.3) e considerando a exclusão dos outliers, foram, respectivamente, 0,016 e 0,145 para a precipitação oriunda da interpolação por IDW ( $PPT_{IDW}$ ), e 0,014 e 0,143 respectivamente, para a precipitação oriunda do banco de dados TerraClimate ( $PPT_{TC}$ ). Apesar da diferença na magnitude dos valores máximos e mínimos, o valor da amplitude de ambas variáveis é mesmo (0,129).

### 2.3.2 Identificação das regiões hidrologicamente homogêneas

Na Figura 2.10 estão apresentados os mapas com os agrupamentos das estações fluviométricas, considerando até três regiões hidrologicamente homogêneas ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

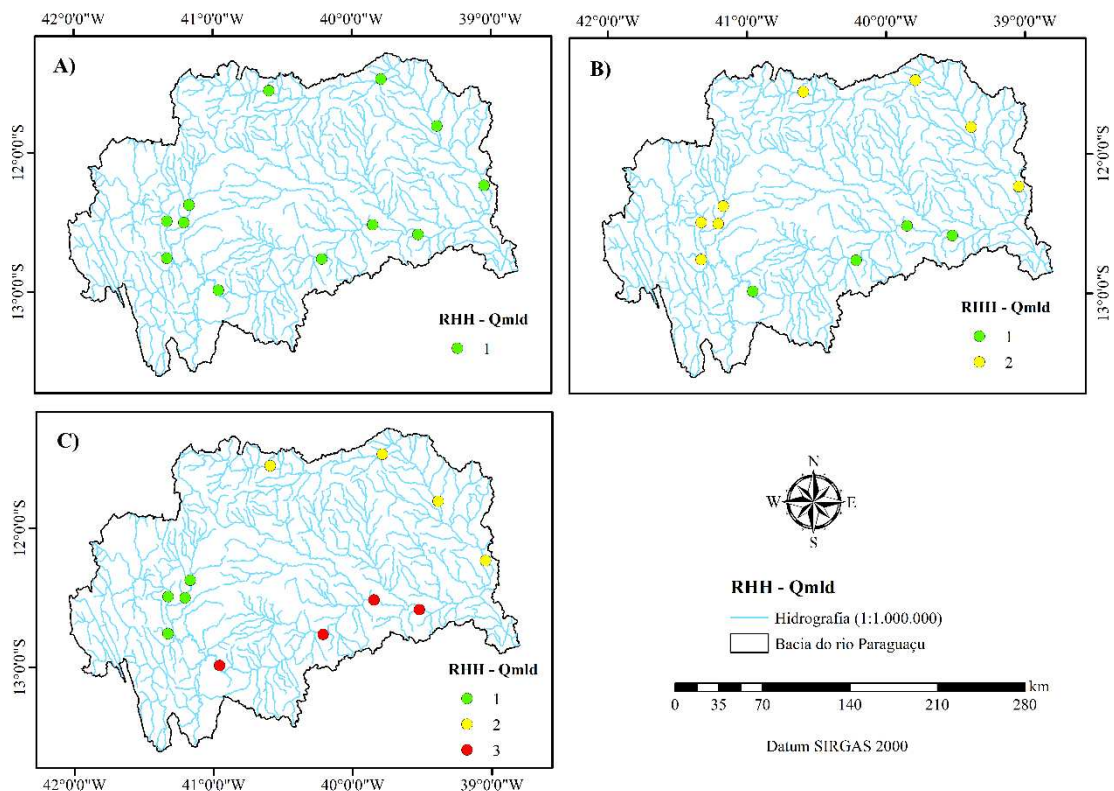


Figura 2.10 - Agrupamento das estações fluviométricas considerando uma região (A) duas regiões (B) e três regiões (C) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

A definição das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH), considerando diferentes arranjos e o agrupamento das estações fluviométricas, conduziu à escolha de uma única região como melhor resultado (Figura 2.10). Apesar de ser uma escolha pautada pela

subjetividade, ressalta-se que, um dos principais critérios para definição da RHH foi estabelecido com base na quantidade de estações fluviométricas em cada agrupamento, com séries históricas dentro do período base, visto que proporciona maior representatividade do comportamento em cada região. As medidas de discordância não indicaram a necessidade de exclusão de estações e os métodos K-means e Ward conduziram à mesma configuração dos agrupamentos.

### 2.3.3 Equações de regionalização

Na Tabela 2.3 estão apresentadas as equações de regionalização para a vazão média de longa duração  $Q_{mld}$  na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, considerando diferentes variáveis independentes.

Tabela 2.3 - Equações de regionalização da vazão para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e suas respectivas significâncias (p-valor)

Variáveis Independentes	$Q_{mld}$	p-valor (Intercepto)	p-valor (Expoente)
A	$Q_{mld} = 0,0004 A^{1,1455}$	0,00076	0,00009
Peq <sub>TC</sub>	$Q_{mld} = 0,0230 Peq_{TC}^{1,1870}$	0,00217	0,00004
Peq <sub>IDW</sub>	$Q_{mld} = 0,0192 Peq_{IDW}^{1,2183}$	0,00145	0,00003
BH <sub>TC_TC</sub>	$Q_{mld} = 0,2349 BH_{TC}^{1,2177}$	0,00871	0
BH <sub>IDW_TC</sub>	$Q_{mld} = 0,1843 BH_{IDW}^{1,2689}$	0,00016	0

### 2.3.4 Análise de desempenho

A seguir são apresentados os resultados da análise de desempenho, composta pela avaliação do comportamento estatístico, físico e de risco.

#### 2.3.4.1 Análise estatística

Na Tabela 2.4 estão apresentados os índices estatísticos relacionados às equações de regionalização para a vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

De acordo com os valores dos coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{ajust}$ ), os modelos de regionalização apresentam boa qualidade no ajuste com as diferentes variáveis independentes. Dentre essas, a variável A possui o pior ajuste, ou seja, o menor valor de  $R^2_{ajust}$  ( $R^2_{ajust} = 0,78$ ) e o BH<sub>IDW</sub> o melhor ( $R^2_{ajust} = 0,95$ ).

Conforme o índice NSE, todos os modelos de regionalização de vazões são classificados como muito bom ( $\geq 0,75$ ), segundo classificação proposta por Moriasi et al., (2007), isto é, as variáveis explicativas apresentam um ajuste muito bom com o uso do modelo de regionalização potencial. Com relação à sua forma modificada do índice NSE (mNSE), cujo valor sofre menos influência dos valores extremos, apenas o modelo com a variável independente BH<sub>TC</sub> (mNSE = 0,79) manteve a classificação como muito bom ( $\geq 0,75$ ), assim, as demais variáveis independentes passam a ser classificadas com um ajuste bom ( $0,65 < NSE \leq 0,75$ ).

Tabela 2.4 - Índices estatísticos do modelo de regionalização de vazões da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, considerando diferentes variáveis independentes

<b>Índices</b>	<b><math>R^2_{ajust}</math></b>	<b>NSE</b>	<b>mNSE</b>	<b>Se</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>PBIAS</b>
A	0,78	0,79	0,68	0,71	7,96	12,55	-17,90
Peq <sub>TC</sub>	0,81	0,83	0,71	0,66	7,28	11,30	-13,80
Peq <sub>IDW</sub>	0,82	0,83	0,72	0,64	7,03	11,23	-14,90
BH <sub>TC_TC</sub>	0,88	0,92	0,79	0,51	5,31	7,84	-7,60
BH <sub>IDW_TC</sub>	0,95	0,85	0,73	0,32	6,80	10,68	-0,30

No que se refere às medidas de erro, observa-se que a variável A apresenta os maiores valores para os índices erro padrão (*Se*), MAE e RMSE com os respectivos valores de 0,71, 7,96 e 12,55, resultados que indicaram que esta variável apresentou estimativas mais distantes dos valores observados nas estações fluviométricas. Para o erro padrão (*Se*) o menor valor foi registrado pela variável BH<sub>IDW\_TC</sub> (0,32) e os menores valores dos índices MAE e RMSE foram obtidos pela variável BH<sub>TC\_TC</sub>. (respectivamente, 5,31 e 7,84), indicando que os dados simulados são mais próximos dos dados medidos e, portanto, de maior precisão. Em geral, os valores dos erros foram considerados baixos, visto que foram menores que a metade do desvio padrão dos dados (14,26).

Conforme o índice PBIAS todos os valores foram negativos, indicando que os modelos de regionalização tendem subestimar as vazões produzidas. Observa-se ainda que o menor e

maior percentual de subestimação dos valores foram registrados, respectivamente, pelas variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  (0,30%) e A (17,90%).

De maneira geral, os modelos de regionalização apresentaram bom ajuste em relação às variáveis explicativas. Dentre essas, a variável A gerou o pior desempenho em todas as métricas estatísticas analisadas e as variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$  apresentaram os melhores desempenhos estatísticos. Com a aplicação do teste *t-student* ( $t_{calc} = 2,62$ ) concluiu-se que os resultados obtidos pelas variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$  apresentaram diferenças significativas ao nível significância de 1%, cujo valor do t tabelado é 2,2, e, portanto, menor que o valor de t calculado. Apesar do melhor desempenho estatístico das variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$ , não é possível inferir conclusivamente acerca de qual é a melhor. Portanto, torna-se necessária a utilização de análises complementares à estatística.

Conforme Pruski et al., (2012) e Li et al., (2009), para uma melhor representação dos dados é necessária a utilização de procedimentos que representem o comportamento físico dos processos de formação das vazões e a sua análise em relação às vazões regionalizadas. Dessa forma, na sequência são apresentados os estudos referentes às análises física e de risco dos modelos de regionalização na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

#### 2.3.4.2 Análise física

Na Figura 2.11 estão apresentadas as variações do CE ao longo da hidrografia, com escala 1:100.000, obtidas com as variáveis independentes A,  $Peq_{IDW}$ ,  $Peq_{TC}$ ,  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$  para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Verifica-se que o comportamento da  $Q_{mld}$  regionalizada com a variável explicativa A (Figura 2.11 A) não reflete o comportamento do balanço hídrico ao longo da bacia hidrográfica, tendendo a estimar maiores vazões em regiões com pouca precipitação. Esse comportamento também já foi registrado em estudos anteriores (OLIVEIRA, 2019; PRUSKI et al., 2012; REGO, 2013), sendo atribuído ao fato de que os valores de vazão estimados pela variável A são influenciados apenas pelo tamanho da área de drenagem, e, portanto, não representam os aspectos climáticos ao longo da bacia hidrográfica.

Observa-se também que a utilização da variável explicativa área de drenagem (A) na regionalização da  $Q_{mld}$ , produz valores do CE que variam entre 0,011 a 0,307, caracterizando uma amplitude maior que a registrada pelas demais variáveis explicativas e pelas estações fluviométricas (0,016 a 0,145). Entende-se que a extrapolação do limite superior não favorece a o planejamento e gestão dos recursos hídricos, uma vez que a tendência de superestimativa

pode potencializar conflitos pelo uso da água. Nessas situações, é importante destacar que Pruski et al., (2012) propõem a aplicação da imposição do limite superior das vazões, baseado no valor máximo registrado nas estações fluviométricas.

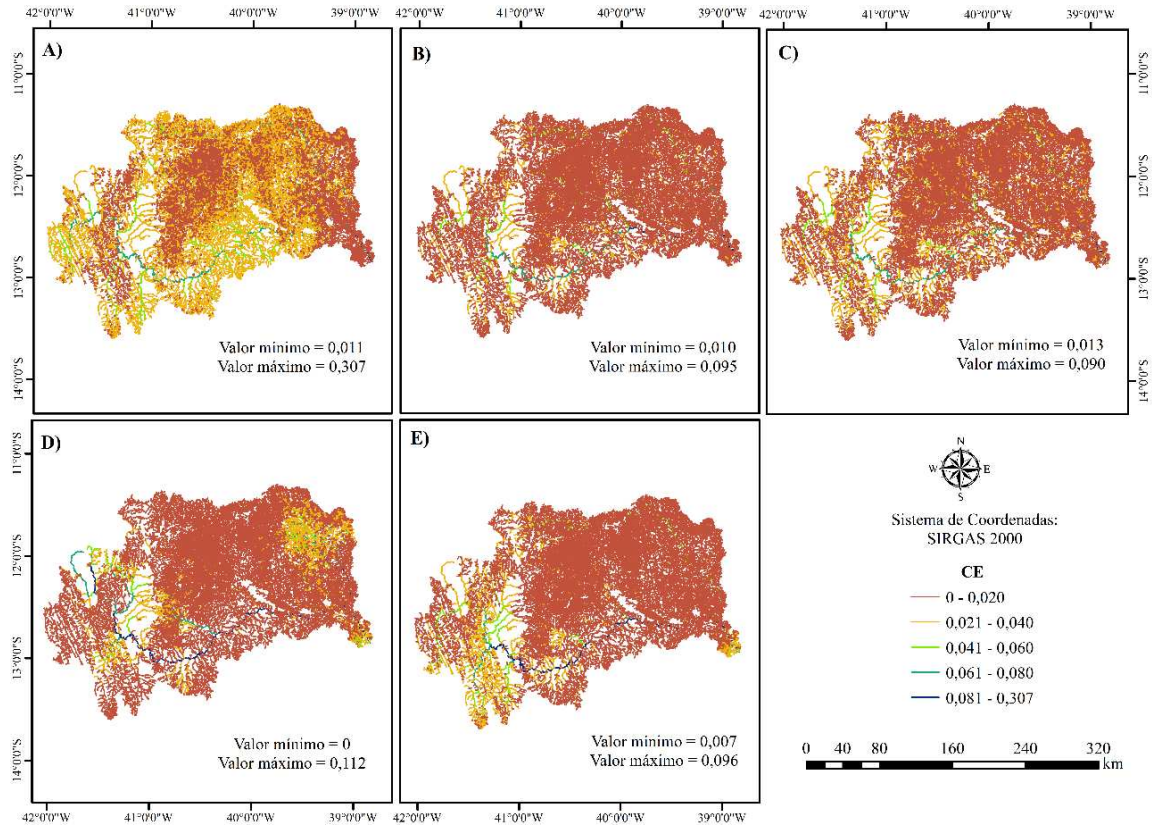


Figura 2.11 - Representação da variação do CE ao longo da hidrografia (escala 1:100.000) utilizando as variáveis: A (A),  $Peq_{IDW}$  (B),  $Peq_{TC}$  (C),  $BH_{IDW\_TC}$  (D) e  $BH_{TC\_TC}$  (E).

De acordo com as Figuras 2.11 B e 2.11 C, observa-se que as variáveis explicativas provenientes da precipitação anual ( $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$ ) conduzem a distribuições espaciais similares, com pequena diferença no extremo oeste, onde a  $Peq_{TC}$  (Figura 2.11 C) tende a apresentar maior frequência de trechos na classe de valores 0,021 - 0,040. Esse comportamento pode ser justificado pela distribuição das precipitações, visto que na região oeste da bacia hidrográfica, na Chapada Diamantina, tem-se a ocorrência do efeito orográfico, caracterizado por chuvas de grande intensidade e volume devido ao aumento da altitude e fatores locais (SELUCHI et al., 2011).

Considerando o efeito orográfico e a maior sensibilidade na captura das variações da precipitação pela variável  $PPT_{TC}$  em relação à  $PPT_{IDW}$ , tem-se a potencialização da distribuição espacial e o aumento da faixa de altas magnitudes no oeste da bacia hidrográfica (Figura 2.6).

Com relação à amplitude, nota-se que a faixa de variação gerada pela  $Peq_{IDW}$  (0,088) é ligeiramente maior que a produzida pela  $Peq_{TC}$  (0,081), e ambas são menores que os valores da amplitude dos dados medidos nas estações fluviométricas (0,129).

Os valores do CE produzidos com a utilização das variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  apresentam os valores mínimos (respectivamente, 0,004 e 0,006) inferiores ao valor mínimo registrado no intervalo de dados observados (respectivamente, 0,016 e 0,014). Isso se repete para os valores máximos (respectivamente, 0,092 e 0,087), que se encontram abaixo do limite superior dos dados medidos das estações fluviométricas (respectivamente, 0,145 e 0,143) e indicam que as vazões estimadas estão dentro do intervalo esperado, ou seja, a favor da segurança hídrica. Essa indicação pode ser confirmada pelo índice estatístico PBIAS para as equações ajustadas com as variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$ .

Pela análise da representação física do CE, observa-se que, de forma geral, a variável independente  $Peq$  apresentou desempenho superior a A, corroborando os resultados obtidos em outros estudos (PRUSKI et al., 2016; PRUSKI et al., 2012; RODRIGUEZ, 2008). Apesar disso, entende-se que as variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  não são suficientes para representar os principais processos hidrológicos visto que não consideram as perdas por evapotranspiração, ou seja, o balanço hídrico na bacia hidrográfica. Portanto, nas Figuras 2.11 (D e E) são apresentados os resultados da espacialização do CE ao longo da hidrografia com a utilização do balanço hídrico como variável explicativa.

Considerando a utilização do  $BH_{IDW\_TC}$  (Figura 2.11 D), observa-se que a distribuição espacial do CE apresenta maior frequência dos valores compreendidos entre 0,021 e 0,040, na região oeste, nordeste e na foz da bacia hidrográfica. O aumento dos valores na área da Chapada Diamantina se justifica pela influência orográfica. Por outro lado, o aumento da magnitude na região nordeste é atribuído à baixa densidade de dados nas séries históricas e estações pluviométricas, no processo de interpolação da precipitação por IDW.

A amplitude do CE, utilizando o  $BH_{IDW\_TC}$ , variou de 0 a 0,108, caracterizando essa variável como a que apresentou amplitude mais próxima dos coeficientes observados nas estações fluviométricas. Além disso, observa-se que o local de ocorrência dos valores máximos e mínimos coincide com os pontos em que são registrados os valores extremos das estações fluviométricas. Entretanto, apesar dos valores de balanço hídrico negativo terem sido anulados, os reflexos desse comportamento inconsistente foram refletidos nos resultados, que registraram  $Q_{mld}$  nula nessas áreas.

A utilização da variável explicativa  $BH_{TC\_TC}$  (Figura 2.11 E) gerou amplitude de 0,02 a 0,093 para o CE e os valores mínimo e máximo foram inferiores aos observados (0,014 a

0,143). O uso do  $BH_{TC\_TC}$ , assim como do  $BH_{IDW\_TC}$ , produziu maiores valores de CE na região sudoeste e na foz da bacia hidrográfica, locais onde ocorrem precipitação ( $PPT_{TC}$ ) mais elevadas, em função, respectivamente, do efeito orográfico e da proximidade com o litoral.

O  $BH_{TC\_TC}$  conduziu ao resultado mais representativo na região nordeste quando comparado ao  $BH_{IDW\_TC}$ , visto que nessa região há predominância do clima semiárido e menores valores de CE. Também é importante destacar que o uso da variável  $BH_{TC\_TC}$ , não demandou ajustes preliminares à sua utilização na regionalização de vazões, como a anulação dos valores negativos.

Com exceção da variável A, os valores do CE gerados pelas demais variáveis se concentraram predominantemente na classe de menor magnitude (0 a 0,020), indicando a tendência de intermitência dos cursos d'água, principalmente em locais com maior densidade de drenagem (Figura 2.5). Tal comportamento pode estar relacionado à extrapolação dos valores ou a incertezas provocadas pelo grau de detalhamento na escala da hidrografia (1:100.000). Diante disso, a seguir é apresentada a espacialização do CE na rede hidrográfica com escala 1:1.000.000, a fim de se traçar um limiar comparativo no que diz respeito às interferências geradas e verificar se essas são decorrentes do grau de detalhamento proveniente da escala.

Na Figura 2.12 estão apresentadas as variações do CE ao longo da hidrografia, com escala 1:1.000.000, obtidas com diferentes variáveis independentes. Observa-se que a utilização da escala da hidrografia no milionésimo (1:1.000.000) conduziu a mudanças na distribuição espacial das vazões e possibilitou maior distinção das classes definidas para o CE. A faixa de variação dos valores não sofreu alterações expressivas quanto ao valor máximo, porém, com exceção da variável  $BH_{IDW\_TC}$ , houve o aumento dos valores mínimos nos mapas.

Dentre as variáveis explicativas, a área de drenagem (A) (Figura 2.12 A) foi a que gerou a maior quantidade de trechos da classe de 0,041 a 0,060, concentrados na parte central da bacia hidrográfica. Entretanto, considerando o clima semiárido, predominante na parte central da bacia hidrográfica, cujo índice pluviométrico é baixo e o poder evaporante da ETR é alto, nota-se que esses valores do CE estimados não são representativos. Do mesmo modo que, os baixos valores (0 a 0,020) na foz conduzem a incertezas da estimativa, já que nessa região ocorrem altas precipitações e concentram-se as contribuições da bacia hidrográfica. Existem inconsistências na alocação do valor máximo (0,316), registrado numa área onde a precipitação e os valores do CE são baixos, indicando a baixa representatividade da variável A.

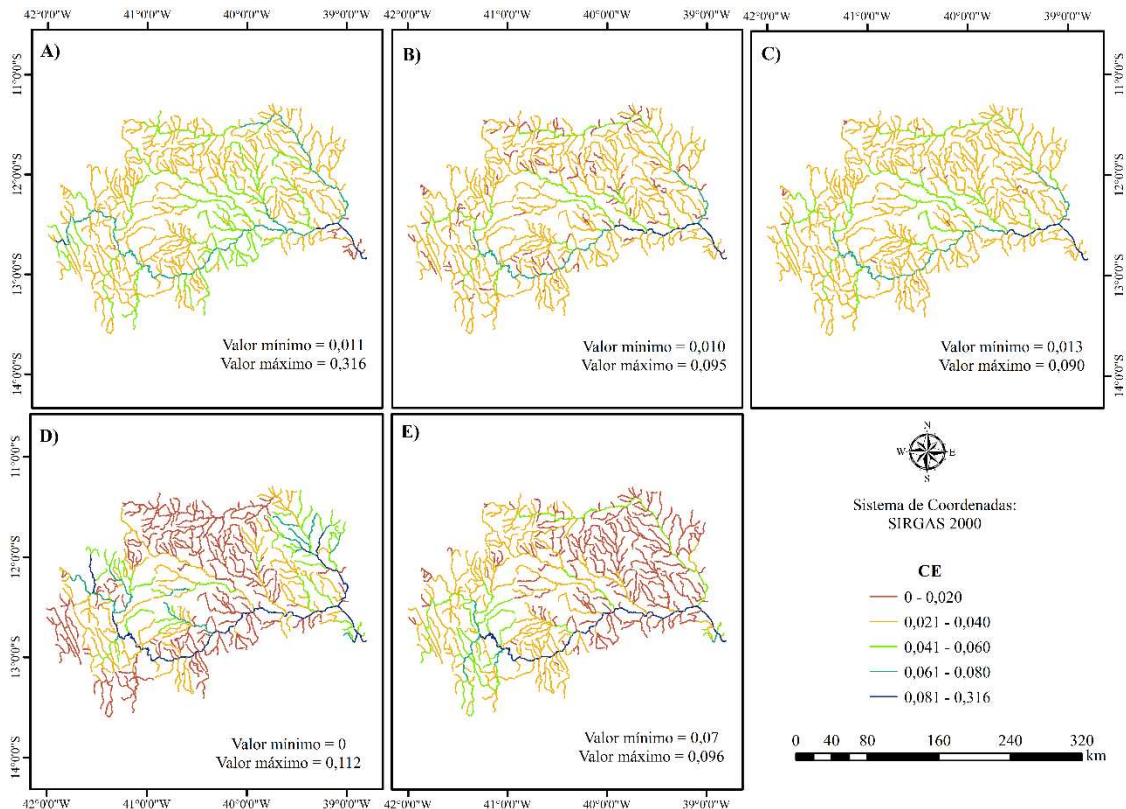


Figura 2.12 - Representação da variação do CE ao longo da hidrografia (escala 1:1.000.000) utilizando as variáveis: A (A),  $Peq_{IDW}$  (B),  $Peq_{TC}$  (C),  $BH_{IDW\_TC}$  (D) e  $BH_{TC\_TC}$  (E).

As variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$ , apresentadas nas Figuras 2.12 (C e D) não registraram variações acentuadas nos valores do CE ao longo da hidrografia, com maior frequência dos valores na classe com intervalo de 0,021 a 0,040. Destaca-se que a  $Peq_{IDW}$  gerou mais trechos na menor classe de magnitude (0 a 0,020), localizados nas cabeceiras de pequenos cursos d'água. Nota-se que as variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  apresentaram comportamentos próximos em relação à distribuição espacial dos valores e amplitude (0,010 a 0,095 e 0,013 a 0,090, respectivamente), caracterizando-se com valores mínimos inferiores à faixa de variação do CE nas estações fluviométricas (0,016 e 0,014, respectivamente).

O uso da variável  $BH_{IDW\_TC}$  produziu maior frequência de valores do CE da classe de menor magnitude (0 a 0,020) ao longo da bacia hidrográfica, distribuídos conforme o balanço hídrico  $BH_{IDW\_TC}$  (Figura 2.8 A). Observa-se também que os valores do CE na região nordeste da bacia se diferenciam do comportamento dos demais mapas, apresentando trechos com magnitudes superiores. A amplitude dos valores do CE (0 a 0,112) foi a maior dentre as variáveis e o valor máximo estimado foi mais próximo do máximo observado nas estações fluviométricas (0,145).

Apesar do modelo de regionalização de vazões com o uso do  $BH_{IDW\_TC}$  ter apresentado bom desempenho na análise estatística, seu comportamento apresenta inconsistências relacionadas à existência de valores de balanço hídrico negativo. Esse resultado reforça a necessidade de análises complementares à análise estatística para seleção do modelo de regionalização mais representativo das condições de circulação da água na bacia.

A utilização do  $BH_{TC\_TC}$  como variável explicativa produziu os menores valores do CE (0 a 0,020) na porção leste da bacia e em parte da região central, cujo clima é semiárido. Os valores do CE compreendidos entre 0,021 e 0,080 distribuíram-se principalmente na região oeste e na foz da bacia, locais influenciados pela orografia e proximidade com o litoral. A amplitude dos valores gerados com o uso da variável  $BH_{TC\_TC}$  variou de 0,007 a 0,096, sendo o valor mínimo inferior ao registrado nas estações fluviométricas. Contudo, a tendência de variação do CE mostrou-se representativa das condições climáticas, com o decréscimo dos valores da região oeste para leste. E da mesma forma que na escala anterior (1:100.000) o  $BH_{TC\_TC}$  conduziu aos resultados de melhor desempenho quanto a caracterização do comportamento espacial do CE ao longo da bacia hidrográfica.

A partir dos resultados apresentados, observou-se que a análise física com a escala 1:1.000.000 possibilitou a obtenção de melhores resultados que a escala de 1:100.000, visto que gerou menor quantidade de trechos de rios pequenos, intermitentes ou temporários, bem como, reduziu o número de trechos na região de extrapolação da equação de regionalização de vazões, aumentando, portanto, a representatividade e confiabilidade do resultado gerado. Ademais, destaca-se a importância da escolha da escala para a representação dos processos físicos de circulação da água em bacias hidrográficas inseridas no semiárido, cuja ocorrência da intermitência dos rios é mais frequente e pode gerar estimativas irreais.

#### **2.3.4.3 Análise de risco**

Na Figura 2.13 estão apresentados os mapas com o CE para os trechos da hidrografia na escala de 1:1.000.000, de acordo com classificação da análise do risco associado às estimativas obtidas a partir do uso de diferentes variáveis independentes.

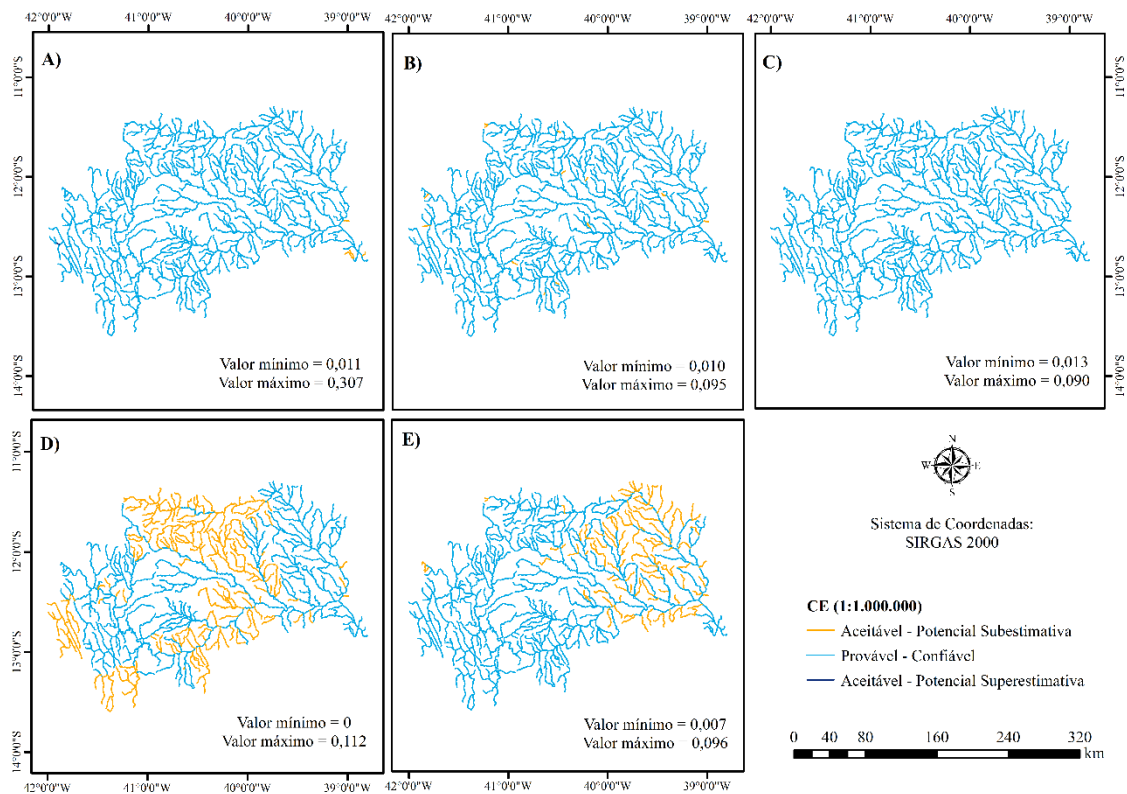


Figura 2.13 - Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu conforme o risco associado aos valores estimados, considerando as variáveis independentes: A (A),  $Peq_{IDW}$  (B),  $Peq_{TC}$  (C),  $BH_{IDW\_TC}$  (D) e  $BH_{TC\_TC}$  (E).

Com base nos mapas apresentados na Figura 2.13, observa-se que apenas a variável A (área de drenagem) conduziu a valores do CE na classe de potencial superestimativa, ou seja, trechos que extrapolaram o valor máximo registrado nas estações fluviométricas (0,145). Esse resultado caracteriza uma inconsistência na espacialização dos valores na rede hidrográfica, uma vez que apenas 2 trechos (0,3%) foram classificados como superestimativas e, se localizam numa região com predominância da classe de valores confiáveis. Mesmo que esteja relacionada a possíveis erros, ressalta-se que a ocorrência de superestimativas das vazões pode potencializar conflitos pelo uso da água em virtude de estimar uma quantidade de água superior à disponibilidade hídrica. Assim, não é recomendado a utilização dessas informações para fins de planejamento e gestão dos recursos hídricos, pois não representam o comportamento real da hidrografia.

Observa-se que para a classe de subestimativas as variáveis A,  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  apresentaram percentuais menores (0,6%, 3% e 0,2%, respectivamente), que as variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$  (40,3% e 19,3%, respectivamente). Os trechos estimados com o  $BH_{TC\_TC}$  concentraram-se na região nordeste da bacia hidrográfica, ao longo do rio Jacuípe, já os

estimados com o  $BH_{IDW\_TC}$  localizaram-se, predominantemente, na parte central e em porções do oeste da bacia, região semiárida. Ressalta-se que o percentual de trechos com subestimativa gerados com o  $BH_{IDW\_TC}$  também considera os valores negativos oriundos das áreas com déficit no balanço hídrico que foram anuladas (Figura 2.8). Outra explicação para tais percentuais, refere-se ao menor balanço hídrico nessas regiões.

Os trechos com tendência de subestimativa estão localizados em regiões de baixo balanço hídrico, o que é um indicativo de que as vazões nessas regiões são menores. Contudo, nessas regiões não se tem estações fluviométricas, fato que dificulta a avaliação da representatividade dos valores regionalizados. A classe de potencial subestimativa é aceitável do ponto de vista do planejamento e gestão dos recursos hídricos, uma vez que a estimativa de valores menores é provável e contribuem para maior segurança hídrica.

No que se refere aos valores da classe confiável, nota-se que o maior percentual foi gerado pela variável A, ocupando 99% dos trechos. E a classificação dos valores do CE estimados pelas variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  correspondeu a 97% e 99,8%, respectivamente. Os percentuais elevados nessa classe podem estar relacionados com as pequenas amplitudes do CE estimados por essas variáveis, acarretando no predomínio de valores nessa classe.

De acordo com Ribeiro (2020), a obtenção majoritária de trechos na faixa de valores confiáveis constitui o recomendado para a estimativa dos modelos de regionalização, porém esses resultados podem ser fruto de uma amplitude com faixa de variação pequena e, portanto, inserida nos limites dos intervalos dos dados observados, mas que não representando as condições reais do regime hidrológico. Dessa maneira, a fim de promover maior caracterização ao processo de regionalização, espera-se as estimativas dos modelos contemplem os valores mínimos e máximos, mas com uma ocorrência minimizada de valores superiores e inferiores aos observados.

Por meio da análise de risco percebe-se que as variáveis explicativas  $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$  apresentaram comportamentos diferenciados em relação as demais variáveis explicativas e foram compatíveis com as variações do balanço hídrico da bacia hidrográfica. Diante disso e das discussões apresentadas nas outras análises, entende-se que a utilização da variável explicativa  $BH_{TC\_TC}$  conduz a resultados coerentes do ponto de vista físico e climático e representa melhor o processo de circulação de água na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

## 2.4 CONCLUSÃO

O presente trabalho busca aprimorar a estimativa da disponibilidade hídrica por meio de variáveis explicativas mais representativas do comportamento hidrológico na bacia hidrográfica. Nesse sentido, a utilização dos dados espaciais é uma ferramenta de suma importância para suprir a escassez de dados, principalmente em áreas de grande extensão ou de difícil acesso, possibilitando a obtenção de resultados concisos e capazes de subsidiar o planejamento e as tomadas de decisão voltadas as vazões médias.

A utilização do balanço hídrico obtidos por dados do TerraClimate como variável explicativa (BH<sub>TC\_TC</sub>) dos modelos de regionalização de vazão média conduziu aos melhores resultados na análise de desempenho, apresentando índices estatísticos satisfatórios e comportamento físico representativo das vazões ao longo da hidrografia. Além disso, essa variável é a consideração das condições edafoclimáticas e vegetativas ao longo da bacia, sendo, portanto, a mais recomendada para a regionalização de vazões da bacia do rio Paraguaçu.

Outra constatação importante refere-se à escala da hidrografia (1:100.000) utilizada para a espacialização dos valores da vazão média, e que não conduziu a resultados de vazões regionalizadas representativos em função da existência de rios intermitentes nessa bacia e a maior incerteza associada à estimativa desses trechos de rio. Por outro lado, o uso da escala de 1:1.000.000, reduziu a incerteza associada à estimativa de rios intermitentes e possibilitou análise mais representativa das vazões regionalizadas. Desse modo, a escolha da escala no processo da espacialização dos valores estimados por meio da regionalização de vazões deve ser um fator considerado e analisado com mais critério.

## 2.5 REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.
- ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S. P. R. Regionalização de vazões médias de longo período para o estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 3, p. 93-102, 2005.
- ARMANIOS, D. E.; FISHER, J. B. Measuring water availability with limited ground data: assessing the feasibility of an entirely remote- sensing- based hydrologic budget of the Rufiji Basin, Tanzania, using TRMM, GRACE, MODIS, SRB, and AIRS. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 853-867, 2014.

- 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, 2014.
- BAHIA. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Médio e Baixo Rio Paraguaçu**. Volume VI - Documento Síntese. Superintendência de Recursos Hídricos. Governo do Estado da Bahia. p.195, 1996.
- 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, 2014.
- CARELLI, L.; SANTO, S. M. **Semeando águas no Paraguaçu** / organizadores: Ivana R. Lamas, S471 Luciana Santa Rita, Rogério Mucugê Miranda. – Rio de Janeiro: Conservação Internacional, Brasil, 2016.
- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 43–51, 2002.
- CIB. Conservation International Brazil. Bacia do Paraguaçu. Disponível em: <<https://www.conservation.org/brasil/onde-trabalhamos/bacia-do-paraguacu>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2020.
- COSTA, A. S.; CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalização de curvas de permanência de vazão de regiões hidrográficas do estado do Pará. **Revista brasileira meteorológica**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 413-422, 2012.
- DINIZ, R. B. N.; SOARES, V. G.; ANJOS, L. F. C. Uso de Técnicas de Mineração de Dados na Identificação de Áreas Hidrologicamente Homogêneas no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.1, pp. 65-75, 2012
- FOX, D. G. Judging air quality model performance. Bulletin of the American Meteorological Society. **American Meteorological Society**, [s.l.], v. 62, n. 5, p.599-609, 1981.
- GASQUES, A. C. F.; NEVES, G. L.; SANTOS, J. D.; MAUAD, F. F.; OKAWA, C. M. P. Regionalização de vazões mínimas: Breve revisão Teórica. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 60-70, 2018.
- GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. Impacto das mudanças climáticas nas vazões do rio Paraguaçu – Cenário A1B de 2011 a 2040. IN: **XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Anais. João Pessoa – PB, 2012.
- GONÇALVES, M. J. de S. **Gestão Quantitativa das Águas Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu no Estado da Bahia** - Brasil. Tese de Doutorado – Universidade Federal da Bahia, 2014.
- GPRH - Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM. 415p., 2012.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN S.; YAPO P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. **Cambridge University Press**, 1997.
- 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, 2005.
- LI, Z.; LIU, W. Z.; ZHANG, X. C.; ZHENG, F. L. 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.
- 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, 2014.
- 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, 2011.
- MEDEIROS, Y. Análise dos impactos das mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 127–136, 2003.
- 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.
- 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.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte, CPRM, 552p., 2007.
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. **Journal of Hydrology**, v. 121, n. 1–4, p. 217–238, 1990.
- NETO, J. V.; DOS SANTOS, C. B.; TORRES, É. M.; ESTRELA, C. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, p. 1–6, 2017.
- NOVAES, L. F. de; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. del G. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 1, p. 62-74, 2009.
- NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. Viçosa, MG: UFV. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 104p, 2005.
- OLIVEIRA, J.; PRUSKI, F. 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.
- OLIVEIRA, J. R. S. Aprimoramento do processo de regionalização de vazões visando o planejamento e a gestão de recursos hídricos. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 140f, 2019.

- 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, 1999.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. D. 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, 2013.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F de. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management - WRIM**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2012.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, P. L.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 830-838, 2016.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; SOUZA, J. F., SILVA, B.; SARAIVA, I. S. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural para a gestão dos recursos hídricos. **Eng. Agrícola Jaboticabal**, v. 31, n. 1, p. 67-77, 2011.
- OUYANG, Y. A potential approach for low flow selection in water resource supply and management. **Journal of Hydrology**, v. 454–455, p. 56–63, 2012.
- RAO, A.R.; SRINIVAS, V.V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis, **Journal of Hydrology**. v.318, p.57-79, 2006.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 8, p. 958–975, 2013.
- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 53f, 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.
- RIBEIRO, R. B. **Critérios de valoração do uso da água considerando o manancial de captação subterrâneo e a regularização de vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- RIBEIRO, R. B. **Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.
- RODRIGUEZ, R. D. G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 254p, 2008.
- SANTHI, C, J. G.; ARNOLD, J. R.; WILLIAMS, W. A.; DUGAS, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal American Water Resources Association**, v. 37, n.5, p. 1169-1188, 2001.

- SELUCHI, M.E.; CHAN CHOU, S.; GRAMANI, M. A case study of a winter heavy rainfall event over the Serra do Mar in Brazil. **Geofísica internacional**, v. 50, n. 1, p. 41-56, 2011.
- SHEFFIELD, J.; FERGUSON, C. R.; TROY, T. J.; WOOD, E. F.; MCCABE, M. F. Closing the terrestrial water budget from satellite remote sensing. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 7, 2009.
- SMAKTHIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 147-186, 2001.
- 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, F., MACEDO; M. J. H.; GUEDES, R. D. S.; SILVA, V. The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). **Ambiência**, v. 12, n. 2, p. 707–719, 2016.
- SOUSA, H. T. DE. Sistema computacional para regionalização de vazões. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2009.
- SOUSA, J. R. C. **Hydrology Plus: sistema computacional para estudos meteorológicos e hidrológicos**. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 131p, 2017.
- VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1539, 2003.
- 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.
- VON SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. **1.ed.** Editora da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- WANG, H.; GUAN, H.; GUTIÉRREZ-JURADO, H. A.; SIMMONS, C. T. Examination of water budget using satellite products over Australia. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 546-554, 2014.
- WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, **Academic Press**, v. 91, 627 p, 2006.

### **3 CAPÍTULO 3 – Aprimoramento do método de regionalização de vazões mínimas com a utilização de dados espaciais**

#### **RESUMO**

A disponibilidade hídrica natural é representada pelas vazões mínimas, as quais são comumente adotadas como referenciais para concessão de outorga e, portanto, são fundamentais para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Diante disso, o processo para obtenção dessas estimativas deve ser sempre aperfeiçoado, a fim de representar o comportamento ao longo da hidrografia. Este trabalho teve como objetivo aprimorar o processo de regionalização de vazões mínimas usando variáveis explicativas que considerem os processos físicos de circulação da água numa bacia hidrográfica. Para isso foram utilizadas as características: área, precipitação e evapotranspiração real. A precipitação (PPT) foi obtida por duas metodologias: PPT<sub>IDW</sub> oriunda da interpolação pelo método da ponderação do inverso do quadrado da distância (IDW) e PPT<sub>TC</sub> obtida pelo banco de dados TerraClimate. A evapotranspiração real (ETR<sub>TC</sub>) foi proveniente do banco de dados TerraClimate. A identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) foi realizada pela análise de Cluster com os métodos de Ward e K-means e a avaliação dos agrupamentos gerados, foi realizada com a continuidade geográfica e com estatísticas baseadas em momentos-L. A regionalização foi desenvolvida considerando as variáveis explicativas: área de drenagem, vazão equivalente ao volume precipitado (Peq) e vazão equivalente ao volume precipitado menos a evapotranspiração real, na área de cada trecho da hidrografia (BH). A vazão regionalizada foi a vazão mínima associada à permanência de 90% no tempo (Q<sub>90</sub>). Os modelos de regionalização de vazões obtidos foram avaliados por análises estatísticas, física e de risco. O BH<sub>TC\_TC</sub> proveniente da combinação da precipitação e evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate apresentou o melhor ajuste estatístico. E nas análises física e de risco o BH<sub>TC\_TC</sub> gerou valores com magnitudes condizentes com tipologia climática e com relevo, caracterizando o efeito orográfico, classificados majoritariamente como confiáveis e sem valores negativos de vazão. Portanto, a variável BH<sub>TC\_TC</sub> conduziu ao comportamento mais representativo das condições dos processos físicos de circulação da água na bacia hidrográfica.

### 3.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade hídrica é parte fundamental dos estudos hidrológicos e para a tomada de decisão no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos (SILVA et al., 2009; GONÇALVES et al., 2018). Essa disponibilidade é caracterizada pelas vazões mínimas e médias (NOVAES et al., 2009), sendo que a primeira representa a disponibilidade hídrica em condições naturais e a segunda a disponibilidade potencial em condições de regularização de vazão.

As vazões mínimas são amplamente utilizadas como referência para concessão de outorgas (BOF et al., 2013; LELIS et al., 2020). No Brasil as vazões mais usadas nesse sentido são a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) e as vazões com 90% ( $Q_{90}$ ) e 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) no tempo (LELIS et al., 2020), sendo que cada estado estabelece sua vazão de referência (GOMES e FERNANDES, 2017). Por exemplo, o estado da Bahia adota a vazão  $Q_{90}$ , critério considerado como permissível em relação a  $Q_{7,10}$  e  $Q_{95}$ .

Para a estimativa da disponibilidade hídrica são utilizados dados de séries históricas obtidos em estações fluviométricas, porém esses dados nem sempre estão disponíveis para as seções de interesse (NRUTHYA e SRINIVAS, 2015) ou não representam efetivamente as condições da área de drenagem (PANDEY e NGUYEN, 1999). Nesse sentido, com o intuito de suprir a falta de informações nos locais em que os dados são escassos ou inexistentes, utiliza-se a regionalização de vazões, que pode ser definida como o processo de transferência de informações de variáveis hidrológicas existentes numa região, para outro local com características físicas e climáticas semelhantes (CHAVES et al., 2002; TUCCI, 2002; PRUSKI et al., 2012).

Para a regionalização de vazões, geralmente, são ajustadas equações de regressão que relacionam as informações hidrológicas de interesse com características das bacias (variáveis explicativas) (ARSENAULT e BRISSETTE, 2014; BAO et al., 2012). A escolha de variáveis a serem utilizadas nas equações de regressão possui grande influência no desempenho dos modelos de regionalização de vazões (RAZAVI e COULIBALY, 2013), sendo constante a busca por variáveis explicativas que conduzem a modelos de regionalização satisfatórios. Apesar de diversos estudos terem sido desenvolvidos com esse intuito, não existe uma variável que seja consagrada como única solução (ZAMOUM e SOUAG-GAMANE, 2019), sendo a melhor aquela que mais se ajusta às condições da bacia.

No estudo desenvolvido por Rego (2013), para a bacia do rio Paracatu e Pará, foi proposta a utilização de uma variável que considera a vazão equivalente a lâmina precipitada numa área de drenagem menos um fator de abstração correspondente a evapotranspiração real média obtida pelo método do balanço hídrico das estações, tendo sido gerados modelos de regionalização de vazões com desempenho satisfatório. Nesse mesmo aspecto, Ribeiro (2020) abordou em seu estudo, realizado para três bacias hidrográficas, o uso do fator de abstração correspondente a ETR obtida por sensoriamento remoto, tendo também obtido resultados satisfatórios. Contudo, foi observado um pior desempenho dos modelos de regionalização de vazões mínimas em regiões de menor disponibilidade hídrica.

No nordeste do Brasil a parte semiárida é talvez a região mais vulnerável às secas (MARENGO ORSINI et al., 2018), visto que tem como principal característica a alta variabilidade espacial e temporal do clima. O padrão de variação climática expõe a região a eventos extremos de seca e atribui grandes incertezas sobre os recursos hídricos, impondo uma utilização mais conservadora e uma relativa redução nos estoques de água disponíveis (TUCCI e BRAGA, 2003). Soma-se a isso, a dificuldade de obtenção de dados, que dificulta a compreensão dos processos hidrológicos da região semiárida e não contribui para estimativas precisas e confiáveis da disponibilidade hídrica (SOUZA et al., 2015; MOHEBZADEH e FALLAH, 2019).

Considerando as dificuldades inerentes ao semiárido e os desafios decorrentes da estimativa da disponibilidade hídrica de maneira mais representativa, o objetivo desse trabalho é aprimorar o processo de regionalização de vazões mínimas usando variáveis explicativas que considerem os processos físicos de circulação da água numa bacia hidrográfica.

## **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1 Regionalização de vazões**

A regionalização de vazões foi realizada pelo método de regressão regional. Esse método se baseia no ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis de interesse, utilizando como variáveis independentes as características físicas e climáticas a fim de se obter a vazão em qualquer local da área em estudo (BLÖSCHL et al., 2013; ENGELAND e HISDAL, 2009; PRUSKI et al., 2013). Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma das etapas da regionalização de vazão mínima.

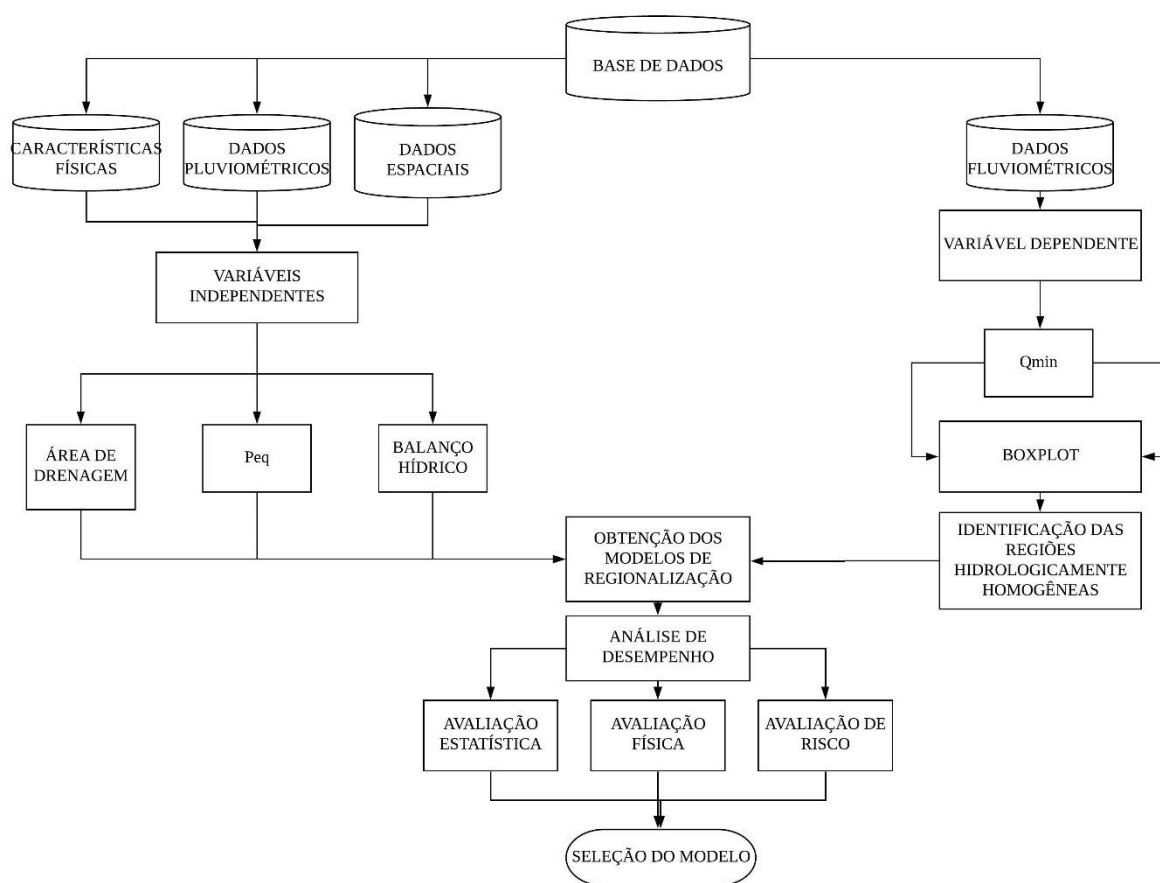


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da regionalização da vazão mínima.

### 3.2.2 Base de dados

Foram utilizados dados de estações fluviométricas e pluviométricas, da rede hidro meteorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da ANA e dados de precipitação e evapotranspiração real obtidos, em escala mensal, por meio de imagens do banco de dados espaciais TerraClimate. O período base foi definido em 20 anos, considerando até 5% de falhas nos dados anuais para o intervalo de 1972 a 2013.

As estações pluviométricas foram selecionadas dentro da bacia hidrográfica ao seu entorno, aumentando o raio progressivamente, até alcançar a maior cobertura da área de estudo. Para a elaboração dos mapas foi adotado sistema de projeção Albers e o Datum SIRGAS - 2000.

### 3.2.3 Variáveis independentes

Para avaliar o desempenho das variáveis explicativas no processo de formação das vazões foram selecionadas variáveis independentes que representassem as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

A variável área de drenagem (A) foi utilizada para representar os aspectos físicos da bacia hidrográfica, visto que essa é uma característica física essencial no processo de formação das vazões médias e mínimas (RIBEIRO et al., 2005). E as características climáticas foram representadas pela precipitação média anual, uma vez que sua utilização tem apresentado melhorias no modelo de regionalização (PRUSKI et al., 2012).

Considerando que uma parcela da água precipitada retorna para a atmosfera por meio da evapotranspiração, essa variável foi escolhida para representar a abstração que ocorre no processo. A evapotranspiração é o principal fator da abstração inicial do processo de formação de vazões (OLIVEIRA et al., 2013; REGO, 2013).

Dessa forma, foram utilizadas as variáveis independentes: área de drenagem (A); área de drenagem combinada com a precipitação média anual, por meio da vazão equivalente ao volume precipitado na área de drenagem (Peq) (Equação 1); e o balanço hídrico (BH), em que a vazão é equivalente ao volume precipitado menos o fator de abstração atribuído à estimativa evapotranspiração real para cada sub-bacia (ETR) (Equação 2). As equações usadas para calcular as variáveis independentes, citadas anteriormente, são expressas a seguir:

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

$$BH = \frac{(P - ETR) A}{k} \quad (2)$$

em que: P = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm ano<sup>-1</sup>; A = área de drenagem, km<sup>2</sup>; ETR = evapotranspiração real anual em cada trecho da hidrografia, mm ano<sup>-1</sup>; 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<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>; BH = vazão equivalente ao balanço hídrico obtido com a ETR, m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

### 3.2.3.1 Área de drenagem

Para obtenção da área de drenagem da bacia hidrográfica foi realizado o download do modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de 30 m, disponível na plataforma <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Após a aquisição da imagem realizou-se o preenchimento das depressões espúrias, gerando o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido (MDEHC). Os procedimentos foram realizados por meio do software Arcgis 10.5.

### 3.2.3.2 Precipitação

A precipitação foi dividida conforme a forma de obtenção dos dados. Assim, denominou-se  $PPT_{IDW}$  para aquela proveniente dos dados das estações pluviométricas interpolados pelo método Inverso Quadrado da Distância (IDW), com resolução de 1 km, e  $PPT_{TC}$  para os dados de precipitação oriundos do banco de dados TerraClimate (~ 4 km), disponível no site <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>. Cada variável foi combinada à área de drenagem das sub-bacias, produzindo as variáveis explicativas  $Peq_{IDW}$  e  $Peq_{TC}$  (Equação 1).

### 3.2.3.3 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ETR) foi obtida do banco de dados do TerraClimate ( $ETR_{TC}$ ), com dados mensais calculados por meio do modelo de balanço hídrico climático de Thornthwaite-Mather modificado e resolução espacial de  $1/24^\circ$  (~ 4 km) (ABATZOGLOU et al., 2018).

### 3.2.3.4 Balanço Hídrico

Considerando os melhores desempenhos quanto à representatividade do comportamento físico e climático para a bacia hidrográfica no Capítulo 1, foram selecionadas as variáveis  $BH_{IDW\_TC}$  ( $PPT_{IDW} \times ETR_{TC}$ ) e  $BH_{TC\_TC}$  ( $PPT_{TC} \times ETR_{TC}$ ) para calcular os balanços hídricos.

De modo a evitar a propagação das inconsistências ou valores negativos de vazão gerados pelo  $BH_{IDW\_TC}$  na regionalização de vazões, anulou-se esses valores. Cabe ressaltar,

que a sua utilização acarretaria num comportamento hidrológicamente improvável e inconsistente.

### 3.2.4 Variáveis dependentes

A variável dependente utilizada no processo de regionalização foi a vazão mínima ( $q_{\min}$ ) com permanência de 90% do tempo ( $Q_{90}$ ). Essa escolha foi pautada na importância dessa variável para a área de estudo, uma vez que a  $q_{\min}$  é utilizada como referência para a concessão de outorgas.

A obtenção das variáveis dependentes foi realizada para cada estação fluviométrica, considerando o descarte dos anos com falhas superiores a 5%, por meio do programa Hydrology Plus - Sistema Computacional para Estudos Meteorológicos e Hidrológicos (SOUSA, 2017).

#### 3.2.4.1 Identificação de outliers – Boxplot

Para verificação dos dados das estações fluviométricas e retirada dos que possuíam comportamento inconsistente ao longo da série histórica (outliers), foi utilizada a ferramenta estatística boxplot, utilizando os valores das vazões específicas (Equação 3), para a vazão mínima.

$$q_{\min} = \frac{Q_{\min}}{A} \quad (3)$$

em que:  $q_{\min}$  = vazão mínima específica;  $Q_{\min}$  = vazão mínima e;  $A$  = área de drenagem.

O gráfico boxplot tem formato de caixa e divide-se em: limite inferior, primeiro quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e limite superior, conforme especificado nas equações 4 e 5.

$$L_I = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

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

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.

Para identificação dos outliers extremos, cuja discrepância ultrapassa o limite superior estabelecido pelo outliers, foram utilizadas as equações 6 e 7.

$$LE_I = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1) \quad (6)$$

$$LE_S = Q_3 + 3 (Q_3 - Q_1) \quad (7)$$

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.

### 3.2.4.2 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

Para identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) foi utilizado o método da análise de cluster. Esse método leva em consideração as características do local e promove a transformação dos dados coletados em cada estação fluviométrica numa informação com área de maior abrangência (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Entretanto, ao se utilizar a medida de dissimilaridade com o método de aglomeração na análise de cluster tem-se a desvantagem da subjetividade nas escolhas da medida de dissimilaridade, com o método de aglomeração e com as variáveis a serem utilizadas, podendo interferir nos resultados (RIBEIRO, 2016).

A medida de dissimilaridade aplicada foi a distância Euclidiana generalizada (Equação 8), visto que é comumente utilizada e consiste na distância geométrica tomada em um espaço de  $p$  dimensões (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

$$D_{xy} = \sqrt{\sum_{l=1}^p (Z_{xl} - Z_{yl})^2} \quad (8)$$

em que:  $D_{xy}$  = distância Euclidiana entre dois indivíduos  $x$  e  $y$ ;  $Z_x$  = característica relacionada ao indivíduo  $x$ ;  $Z_y$  = característica relacionada ao indivíduo  $y$ .

Para obtenção de regiões geograficamente contínuas foram utilizadas as variáveis latitude e longitude, obtidas a partir de informações pontuais (RAO e SRINIVAS, 2006), e a vazão mínima ( $Q_{90}$ ). Com o intuito de minimizar as interferências causadas pelas diferentes unidades e escalas das variáveis, foi realizada a padronização dos dados (Equação 9):

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (9)$$

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  $x$ .

A análise de cluster das estações fluviométricas foi realizada pelo método hierárquico desenvolvido por Ward e pelo método não hierárquico K-means. O método hierárquico de Ward utiliza a análise da variância para determinar as distâncias entre clusters, aglomerando-os a cada nova iteração e minimizando a soma dos quadrados de quaisquer pares de dois clusters hipotéticos. Por sua vez, o método K-means move os indivíduos iterativamente de um cluster para outro de forma a minimizar a variabilidade intra-cluster e maximizar a variabilidade entre os clusters (NAGHETTINI e PINTO 2007).

### 3.2.4.3 Avaliação dos agrupamentos

A avaliação dos agrupamentos produzidos na análise de cluster consistiu na verificação da relação da continuidade geográfica e das medidas de discordância e de heterogeneidade, estatisticamente baseadas em momentos-L.

A medida de discordância  $D_i$ , denotada por H, e definida em termos de momentos-L, foi aplicada para identificar as estações fluviométricas com comportamento estatístico discrepante no cluster analisado. Assim, a estatística H foi utilizada para avaliar o grau de heterogeneidade da região homogênea, comparando a variabilidade amostral observada com a

variabilidade esperada para a região de interesse. A região é considerada “aceitavelmente homogênea” se  $H < 1$ , “possivelmente heterogênea” se  $1 < H < 2$ , e, “definitivamente heterogênea”, se  $H > 2$  (HOSKING e WALLIS, 1997).

### 3.2.5 Obtenção dos modelos de regionalização de vazão

Para obtenção dos parâmetros que compõem a equação de regressão foi utilizado o Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV 1.0) desenvolvido por Sousa (2009). E para avaliar os resultados obtidos através do programa, foi realizado o ajuste das variáveis ao modelo de regressão potencial, representado pela seguinte equação:

$$Q = \alpha A^a B^b C^c \dots M^m \quad (10)$$

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

### 3.2.6 Análise de desempenho

Após a obtenção das equações que relacionam as vazões às diferentes variáveis independentes, foi selecionada a variável que produziu a condição mais representativa do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Essa seleção foi feita por meio da análise de desempenho, composta pelas análises estatística, física e de risco.

#### 3.2.6.1 Análise estatística

A análise estatística foi determinada pelos seguintes parâmetros: raiz quadrada do erro quadrático médio RMSE (Equação 11), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajust}}$ ) (Equação 12), índice de eficiência de Nash Sutcliffe, na sua forma original (NSE) (Equação 13) e modificada (mNSE) (Equação 14), erro médio absoluto (MAE) (Equação 15), erro padrão ( $se$ ) (Equação 16) e PBIAS (Equação 17).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (E_i - O_i)^2} \quad (11)$$

$$R_{\text{ajust}}^2 = \left( \frac{\sum_1^n (O_i - \bar{O}) (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_1^n (E_i - \bar{E})^2}} \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$\text{mNSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^j}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^j}, \quad \text{com } j \in \mathbb{N} \quad (14)$$

$$\text{MAE} = n^{-1} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (15)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n-2}} \quad (16)$$

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i) 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (17)$$

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 RMSE (Equação 11) é usado para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada, dessa forma os valores RMSE iguais a 0 indicam um ajuste perfeito (WILKS, 2006).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), descrito na Equação 12, descreve a proporção da variância nos dados medidos explicada pelo modelo, variando de 0 a 1. Dessa forma, os valores mais altos indicam menor variância de erro e, normalmente, valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis (SANTHI et al., 2001; VAN LIEW et al., 2003). Embora o  $R^2$  tenha sido amplamente usado para avaliação de modelos, essa estatística é supersensível a valores extremos altos (outliers) e depende do número de observações ( $n$ ), tendendo a crescer quando  $n$  diminui (CECON et al., 2012; LEGATES e MCCABE, 1999).

O índice de Nash e Sutcliffe (Equação 13) é um dos critérios mais importantes estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (MACHADO e VETTORAZZI, 2003), variando entre  $-\infty$  a 1. Os valores próximos a 1 indicam um ajuste ótimo e os valores menores que 0 indicam que a média dos valores observados é um melhor preditor que o modelo. De acordo com Moriasi et al., (2007), o desempenho de modelos é considerado muito bom no intervalo  $0,75 < NSE \leq 1,00$ ; bom no intervalo  $0,65 < NSE \leq 0,75$ ; satisfatório no intervalo  $0,50 < NSE \leq 0,65$  e insatisfatório caso apresente valores menores ou iguais a 0,50. Uma forma de reduzir a sensibilidade desse índice a valores extremos é a utilização de sua fórmula modificada, conforme apresentado na Equação 14 (KRAUSE e BOYLE; BÄSE, 2005).

A Média dos Erros Absolutos (MAE), conforme a Equação 15, é menos afetada por pontos com valores anormalmente extremos (outliers), e é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (FOX, 1981). Valores das medidas de erro iguais a zero indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al., 2007).

O erro padrão da estimativa ( $Se$ ) (Equação 16) é um desvio padrão condicional, na medida em que indica o desvio padrão da variável dependente, dado um valor específico da variável independente. Assim, da mesma forma que o MAE, medidas de erro iguais a zero indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al., 2007).

O enviesamento percentual (PBIAS), expresso na Equação 17, mede a tendência média dos dados estimados de serem maiores ou menores do que os dados observados (GUPTA et al., 1999), ou seja, valores positivos indicam que o modelo está superestimando enquanto negativo indica que está subestimando.

### 3.2.6.2 Análise física

A análise física das equações foi realizada por meio da espacialização dos valores da vazão mínima ao longo da hidrografia, verificando-se a relação da distribuição espacial e magnitude dos valores com o comportamento apresentado nos mapas de precipitação e balanço hídrico e com os valores medidos nas estações fluviométricas. Dessa forma, para reduzir a variação na magnitude dos valores das vazões absolutas utilizou-se a distribuição espacial das vazões específicas ( $q_{esp}$ ).

### 3.2.6.3 Análise de risco

A análise de risco foi realizada conforme a metodologia proposta por Rego (2013) e consistiu na verificação do comportamento das vazões estimadas e espacializadas ao longo da hidrografia. As vazões foram avaliadas conforme as classes definidas pelos limites físicos dos valores da  $q_{\min}$  das estações fluviométricas (Tabela 3.1).

Se os valores estimados forem superiores ao maior valor observado, recebem a classificação de aceitável, por serem fisicamente possíveis, porém com potencial superestimativa. Esses valores tendem a ocorrer em regiões de cabeceira, onde há tendência de crescimento do coeficiente de escoamento e da vazão específica. No entanto, do ponto de vista do planejamento e da gestão dos recursos hídricos, a ocorrência de valores dessa classe gera um cenário que aumenta consideravelmente a disponibilidade hídrica e não representa o comportamento real da hidrografia.

Se os valores estimados estiverem entre os limites máximo e mínimo observados nas estações fluviométricas, são classificados como aceitáveis e de provável ocorrência. Esse intervalo é favorável para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Caso os valores estimados sejam inferiores ao valor mínimo observado nas estações fluviométricas são classificados como aceitáveis, por serem fisicamente possíveis, mas com potencial subestimativa. Essa classe possibilita maior segurança para o planejamento e a gestão de recursos hídricos visto que exige maior rigor no uso da água. No caso das vazões mínimas, o limite de imposição constituiu na máxima vazão específica estimada nas estações fluviométricas consideradas no estudo.

Tabela 3.1 - Intervalos utilizados para análise de risco das vazões regionalizadas

$q_{\min}$	Classificação
$q_{\text{est}} < 0$	Improvável
$q_{\text{est}} > q_{\text{máx\_obs}}$	Aceitável - Potencial de superestimava
$q_{\text{mín\_obs}} < q_{\text{est}} < q_{\text{máx\_obs}}$	Provável – Confiável
$q_{\text{est}} < q_{\text{mín\_obs}}$	Aceitável - Potencial de subestimativa

Fonte: REGO (2013).

em que:  $q_{\min}$  = vazão mínima específica;  $q_{\text{est}}$  =  $q_{90}$  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.

### 3.2.7 Estudo de caso

Considerando importância da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, estado da Bahia, para o contexto nacional e regional e sua vulnerabilidade em decorrência das secas, entende-se que são necessários estudos que contemplem a gestão e o planejamento de recursos hídricos e que contribuam para implementação de melhorias. Dessa forma, os procedimentos metodológicos foram aplicados nessa bacia.

#### 3.2.7.1 Caracterização da área de estudo

A bacia do rio Paraguaçu está inserida no estado da Bahia, está entre as latitudes 11°30'S e 13°30'S, inserida na região semiárida e ocupando área de 54.877 km<sup>2</sup> (GENZ et al., 2012; CARELLI e SANTO, 2016), cerca de 10% do estado. Tem o rio Jacuípe como principal afluente, sendo o ponto de confluência o reservatório de Pedra do Cavalo (SILVA, 2012).

Segundo a tipologia climática de Thornthwaite e Matter, são observados na bacia quatro tipos de clima: semiárido, semiúmido, úmido e superúmido. Embora algumas áreas, como as regiões costeiras, a pluviometria alcance 1600 mm ou mais, anualmente, no interior da bacia, tem precipitação anual média inferior a 400 mm (MEDEIROS, 2003). O clima semiárido é predominante na bacia do rio Paraguaçu (67%) constituindo um cenário com tendência à escassez de água, sendo altamente vulnerável às secas e que depende de reservatórios. Os biomas variam desde a transição entre Caatinga e Mata Atlântica, Caatinga com manchas de floresta estacional e o Cerrado (CARELLI e SANTO, 2016).

Os solos são rasos ou de profundidade média, imperfeitamente drenados, arenosos, no horizonte A e argilosos no horizonte B; o relevo varia do plano ao montanhoso com restrições para agricultura (MEDEIROS, 2003). Mediante à sua extensão, o rio Paraguaçu é dividido em três partes: Alto Paraguaçu, trecho a montante da confluência do rio Santo Antônio; Médio Paraguaçu entre a foz do Santo Antônio e a barragem de Pedra do Cavalo e Baixo Paraguaçu, trecho a jusante dessa barragem (ANA, 2010). Na Figura 3.2 é apresentado o mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, no estado da Bahia.

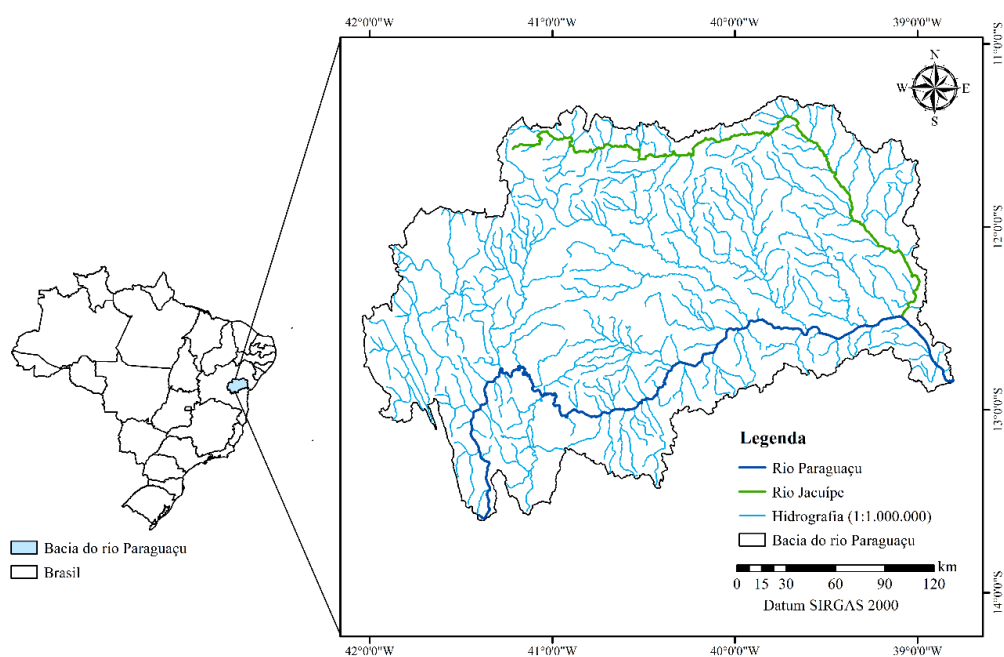


Figura 3.2 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Foram selecionadas 14 estações fluviométricas (Figura 3.3) e 41 pluviométricas (Figura 3.4), com o período base de 1972 a 2013. Esses dados foram adquiridos em fevereiro de 2020. 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 A1 e A2, respectivamente.

O mapa com a espacialização das estações fluviométricas, na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, está apresentado na Figura 3.3.

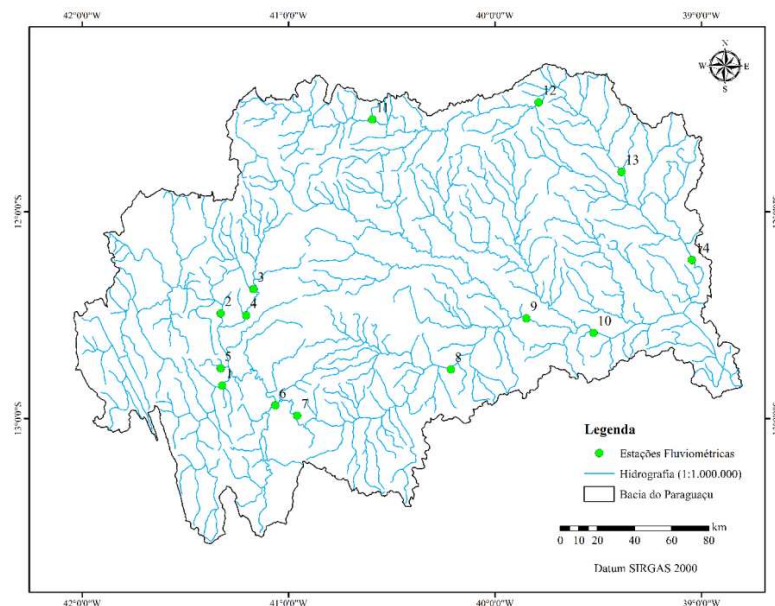


Figura 3.3 - Mapa de localização das estações fluviométricas da área de estudo.

Na Figura 3.4 é apresentado o mapa com a espacialização das estações pluviométricas, na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

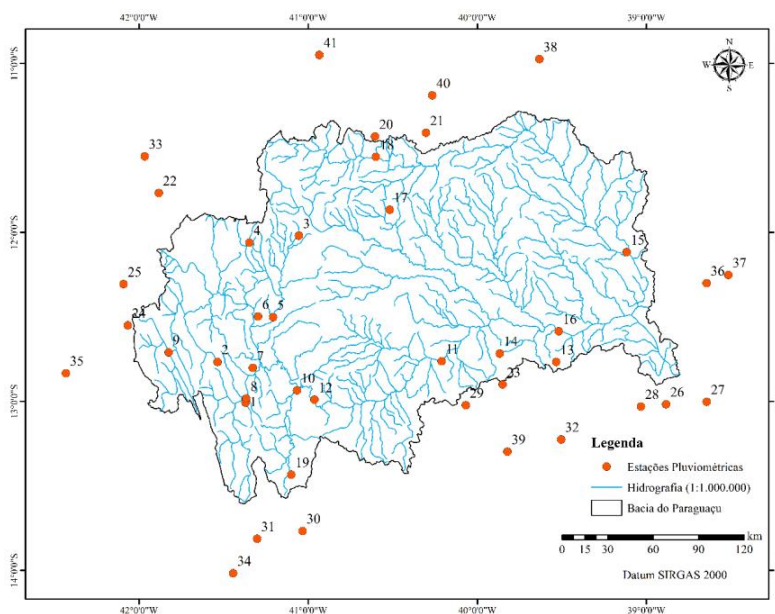


Figura 3.4 - Mapa de localização das estações pluviométricas analisadas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 3.5 são apresentados os mapas de precipitação provenientes dos dados medidos nas estações pluviométricas e interpolados pelo IDW (1972-2013) e do banco de dados TerraClimate (1972-2013).

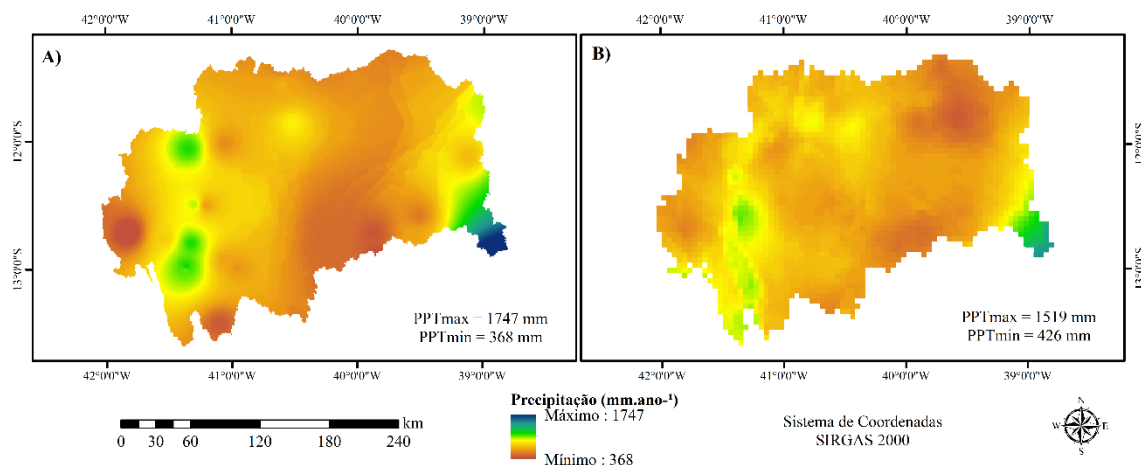


Figura 3.5 - Mapas de precipitação oriundo dos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 3.6 é apresentado o mapa da evapotranspiração real proveniente do banco de dados TerraClimate (1972-2013).

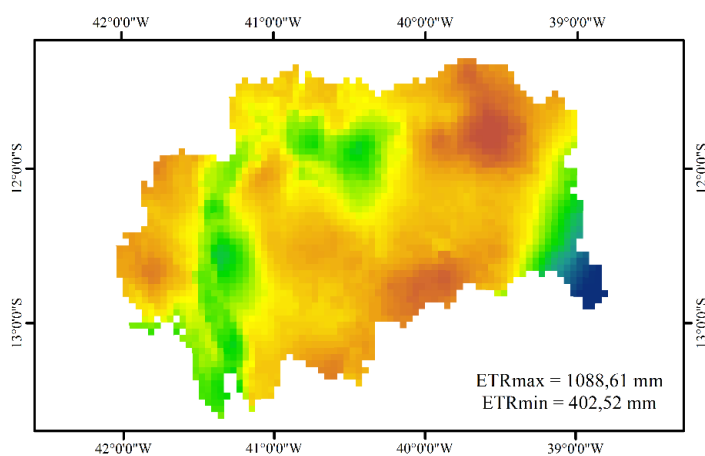


Figura 3.6 – Mapa de ETR oriundo do banco de dados TerraClimate para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Na Figura 3.7 estão apresentados os mapas dos balanços hídricos (BH) considerando a precipitação proveniente dos dados interpolados por IDW e do banco de dados TerraClimate, combinadas à evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate (ETR<sub>TC</sub>).

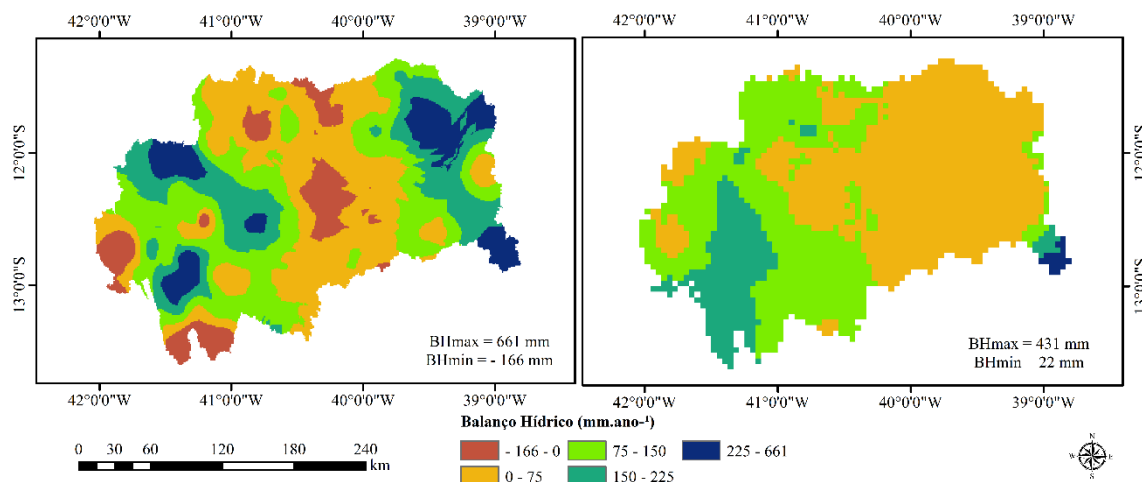


Figura 3.7 - Balanço hídrico obtido pela combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real  $ETR_{TC}$  para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 Variáveis dependentes

Na Tabela 3.2 estão apresentados os códigos, as áreas de drenagem, as vazões mínimas observadas ( $Q_{90}$ ) e as vazões específicas ( $q_{90}$ ) nas estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Tabela 3.2 - Código, área,  $Q_{90}$ , e  $q_{90}$  para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu

ID	Código	Área	$Q_{90}$	$q_{90}$
		(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(L s <sup>-2</sup> km <sup>-2</sup> )
1	51120000	2354,746	1,462	0,621
2	51140000	6179,805	2,022	0,327
3	51166000	734,099	0,406	0,553
4	51170000	2709,996	0,764	0,282
5	51190000	9693,716	3,684	0,38
6	51230000	2125,78	0,489	0,23
7	51240000	16513,501	8,234	0,499
8	51280000	22799,752	7,035	0,309
9	51330000	32024,385	3,046	0,095
10	51350000	37874,146	4,47	0,118
11	51410000	2069,678	0,068	0,033
12	51430000	5046,686	0,006	0,001

Tabela 3.2 - Código, área,  $Q_{90}$ , e  $q_{90}$  para as estações fluviométricas consideradas para o estudo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Continuação)

ID	Código	Área	$Q_{90}$	$q_{90}$
		(km <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	(L s <sup>-2</sup> km <sup>-2</sup> )
13	51440000	7124,284	0,046	0,006
14	51460000	11424,464	0,001	0,001

A menor área de drenagem para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu foi 734,10 km<sup>2</sup> (Tabela 3.2), reforçando a limitação existente na obtenção de informações hidrológicas em cursos d'água com pequenas áreas de drenagem. A amplitude de variação das vazões específicas ( $q_{90}$ ) foi de 0,001 a 0,621 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> e para a  $Q_{90}$  foi de 0,001 a 8,234 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>.

### 3.3.2 Boxplot

Pela análise de boxplot (Figura 3.8) nenhuma estação fluviométrica foi caracterizada como outlier para vazão específica ( $q_{90}$ ).

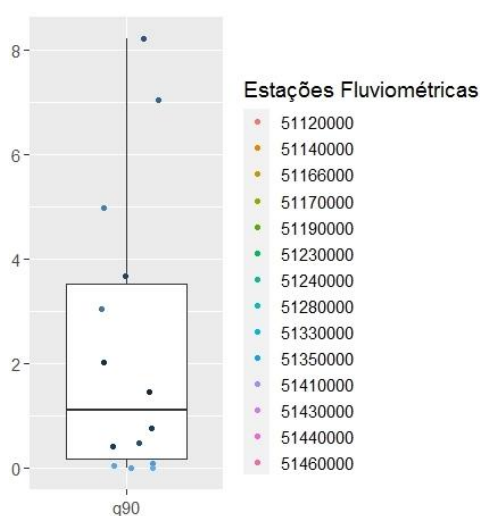


Figura 3.8 - Boxplot da vazão específica ( $q_{90}$ ) para a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 3.3.3 Identificação das regiões homogêneas

Na Figura 3.9 é apresentado o mapa com os agrupamentos das estações fluviométricas, considerando duas regiões hidrologicamente homogêneas longo da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Com base na análise das regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) e considerando a avaliação de diferentes agrupamentos, concluiu-se que para a regionalização das vazões mínimas na bacia do rio Paraguaçu é necessária a adoção de duas regiões hidrologicamente homogêneas (RHH1 e RHH2). Essa divisão justifica-se, principalmente, devido ao comportamento característico das vazões específicas ao longo do rio Jacuípe, localizado na região nordeste da bacia hidrográfica, cujos valores apresentam baixa magnitude e são próximos entre si. As medidas de discordância não indicaram a necessidade de exclusão nenhuma estação fluviométrica.

O pequeno número de estações fluviométricas, a baixa magnitude das vazões mínimas e uma análise prévia da regionalização de vazões na sub-bacia do rio Jacuípe, levou a conclusão de que a regionalização de vazões pelo método das regressões regionais para essa área não possibilita estimativas representativas. Diante disso, a área de drenagem correspondente ao rio Jacuípe foi excluída das análises posteriores. Salienta-se ainda que, de modo a minimizar as interferências associadas às barragens e reservatórios, a delimitação da RHH 1 foi realizada à montante da Barragem Pedra do Cavalo.

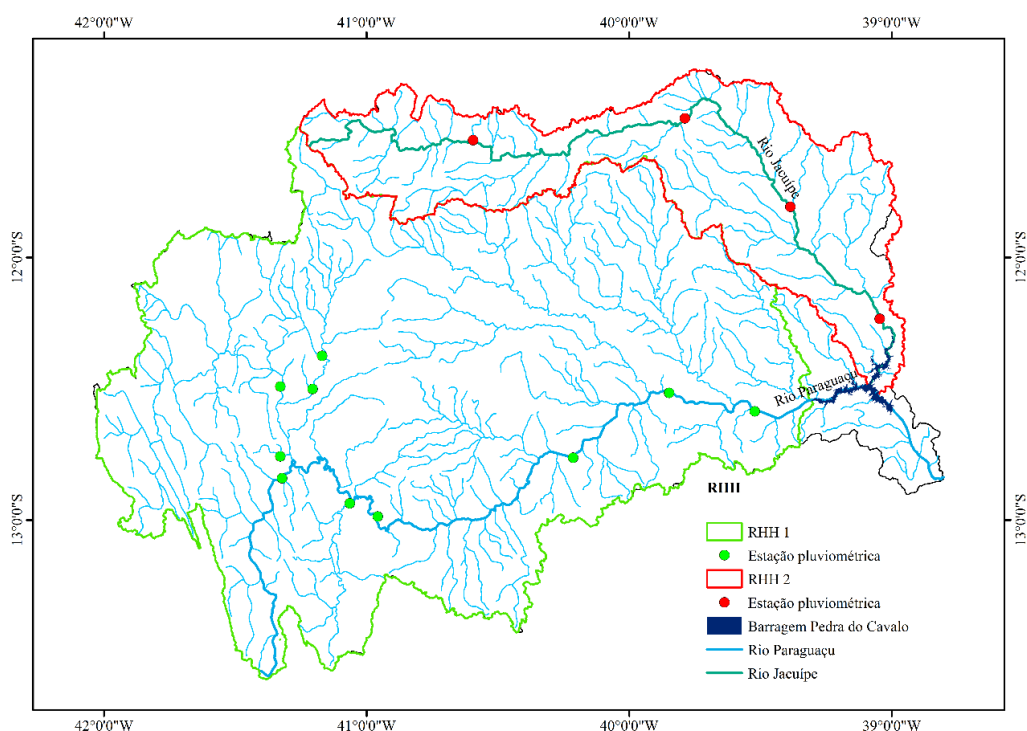


Figura 3.9 - Agrupamento das estações fluviométricas considerando duas RHH, para a vazão mínima ( $Q_{90}$ ).

Na Figura 3.10 são apresentados os mapas de precipitação provenientes dos dados medidos nas estações pluviométricas e interpolados pelo IDW (1972-2013) e do banco de dados TerraClimate (1972-2013) para a RHH 1.

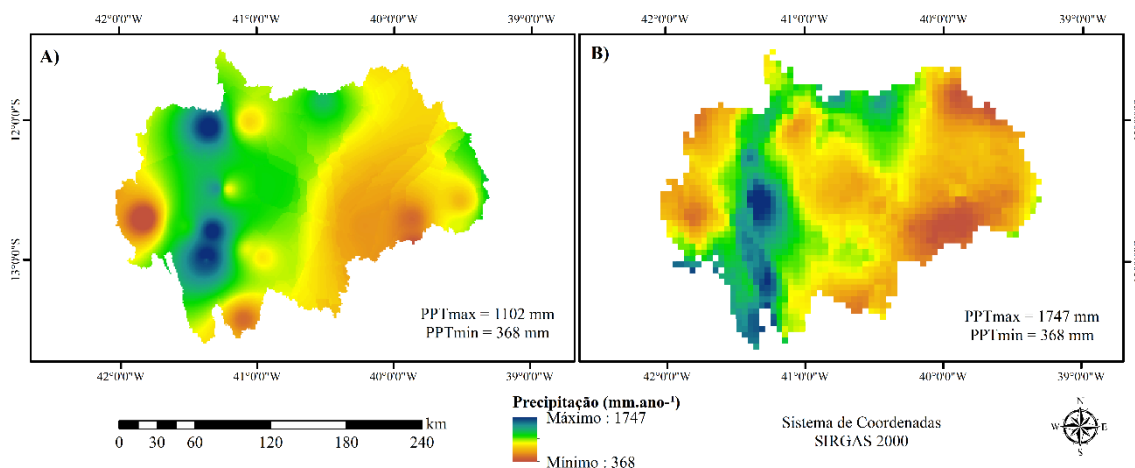


Figura 3.10 - Mapas de precipitação na RHH 1 oriundos de dados interpolados por IDW (A) e do banco de dados TerraClimate (B).

Na Figura 3.11 é apresentado o mapa da evapotranspiração real proveniente do banco de dados TerraClimate (1972-2013) para a RHH 1.

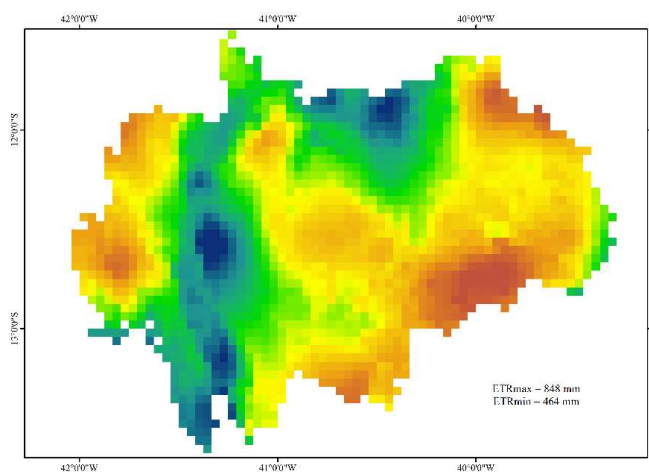


Figura 3.11 - Mapa de ETR obtida do banco de dados TerraClimate para a RHH 1.

Na Figura 3.12 estão apresentados os mapas dos balanços hídricos (BH) considerando a precipitação proveniente dos dados interpolados por IDW e do banco de dados TerraClimate, combinadas à evapotranspiração real do banco de dados TerraClimate (ETR<sub>TC</sub>) pra a RHH 1.

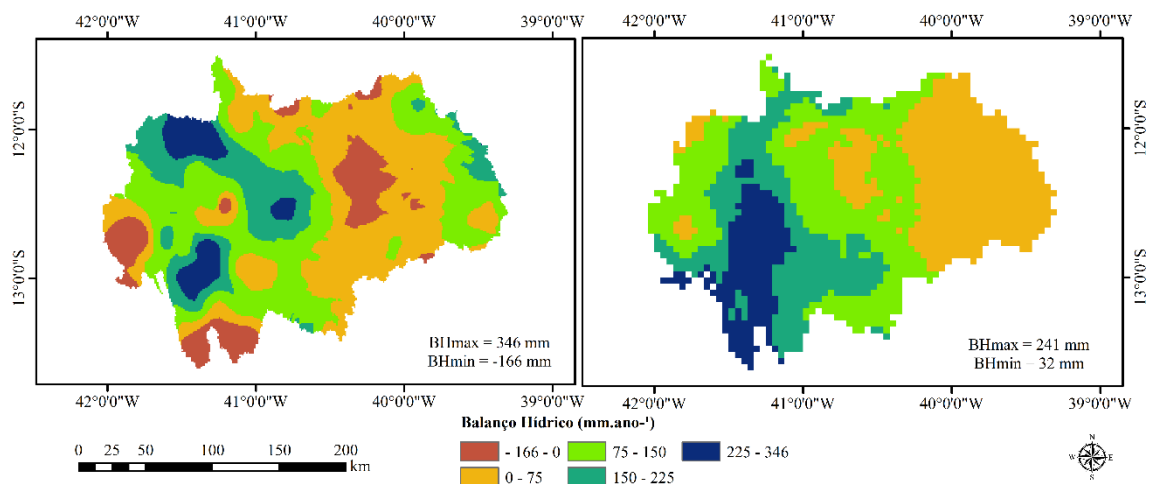


Figura 3.12 - Balço hídrico obtido pela combinação da precipitação obtida pelos dados interpolados por IDW (A) e pelo banco de dados TerraClimate (B), com a evapotranspiração real do banco de dados  $ETR_{TC}$  para a RHH 1.

### 3.3.4 Equações de regionalização

Na Tabela 3.3 estão apresentadas as equações de regionalização para a vazão mínima ( $Q_{90}$ ) na RHH1 da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu. Foram consideradas as variáveis área de drenagem (A),  $Peq_{IDW}$  (proveniente da interpolação por IDW),  $Peq_{TC}$  (oriunda do banco de dados TerraClimate), e os respectivos balanços hídricos ( $BH_{IDW\_TC}$  e  $BH_{TC\_TC}$ ) que consideram as fontes de precipitação mencionadas e a ETR proveniente do banco de dados TerraClimate.

Tabela 3.3 - Equações de regionalização de vazões para a RHH 1 da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e suas respectivas significâncias (p-valor)

Variáveis Independentes	$Q_{mld}$	p-valor (Intercepto)	p-valor (Expoente)
A	$Q_{90} = 0,0037 A^{0,7137}$	0,00134	0,00059
$Peq_{TC}$	$Q_{90} = 0,044 Peq_{TC}^{0,7439}$	0,00194	0,00044
$Peq_{IDW}$	$Q_{90} = 0,0412 Peq_{IDW}^{0,7577}$	0,00177	0,00042
$BH_{TC\_TC}$	$Q_{90} = 0,155 BH_{TC\_TC}^{0,775}$	0,00194	0,00479
$BH_{IDW\_TC}$	$Q_{90} = 0,155 BH_{IDW\_TC}^{0,775}$	0,00479	0,00047

### 3.3.5 Análise de desempenho

A seguir são apresentados os resultados das análises de desempenho estatístico, físico e de risco.

### 3.3.5.1 Análise estatística

Na Tabela 3. 4 são apresentados os índices estatísticos relacionados às equações de regionalização para a vazão mínima, com permanência em 90% do tempo ( $Q_{90}$ ), da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

Conforme os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2_{ajust}$ ) os modelos de regionalização apresentam boa qualidade no ajuste com relação às diferentes variáveis independentes, sendo que dessas, a A possui o pior ajuste ( $R^2_{ajust} = 0,76$ ) e o  $BH_{TC\_TC}$  o melhor ( $R^2_{ajust} = 0,81$ ).

De acordo com resultados do índice NSE, que mede a eficiência do modelo regionalização de vazões, todos foram classificados com ajuste insatisfatório ( $E < 0,50$ ), segundo classificação proposta por Moriasi et al., (2007). Do mesmo modo, para o índice NSE em sua forma modificada (mNSE), que apresenta menor sensibilidade à influência dos valores extremos, todos os modelos apresentaram ajustes classificados como insatisfatórios (mNSE < 0,50).

Tabela 3.4 - Índices estatísticos do modelo de regionalização vazões da RHH1, considerando diferentes variáveis independentes

Índices	$R^2_{ajust}$	NSE	mNSE	$Se$	MAE	RMSE	PBIAS
A	0,76	0,39	0,33	0,52	1,46	2,04	-7,5
$Peq_{TC}$	0,78	0,40	0,33	0,50	1,44	2,01	-6,9
$Peq_{IDW}$	0,78	0,40	0,33	0,45	1,45	2,02	-6,5
$BH_{TC\_TC}$	0,81	0,49	0,38	0,47	1,33	1,86	-6,5
$BH_{IDW\_TC}$	0,78	0,41	0,34	0,51	1,42	2,00	-7,2

Observa-se que dentre as métricas  $Se$ , MAE e RMSE, o valor do erro foi considerado alto para os dois últimos, visto que, apresentaram valores maiores que metade do desvio padrão (1,35) dos dados observados (Tabela 3.2). De acordo com o índice PBIAS, todos as variáveis conduziram à tendência de subestimativas no modelo de regionalização de vazões, em que a variável A apresentou maior percentual (-7,5%) e as variáveis  $Peq_{IDW}$  e  $BH_{TC\_TC}$  o menor (-6,5%).

Dentre as variáveis explicativas utilizadas, o  $BH_{TC\_TC}$  conduziu aos melhores resultados e a variável A aos piores. Apesar disso, não se pode afirmar sobre qual é o melhor modelo considerando apenas os parâmetros de desempenho estatístico, visto que os valores são

próximos entre si. Nesse sentido, Pruski et al., (2012) e LI et al., (2009) afirmaram que a análise estatística é muito relevante para estudos de regionalização de vazão, mas não são suficientes para garantir a representatividade dos resultados. É de suma importância que sejam aplicados procedimentos que facilitem a compreensão do comportamento físico das vazões regionalizadas. Diante disso, na sequência são apresentadas as análises física e de risco dos modelos de regionalização obtidos.

### 3.3.5.2 Análise física

Na Figura 3.13 estão apresentados os mapas com as variações da vazão específica ( $q_{90}$ ) ao longo da hidrografia, na escala 1:1.000.000, para diferentes variáveis explicativas.

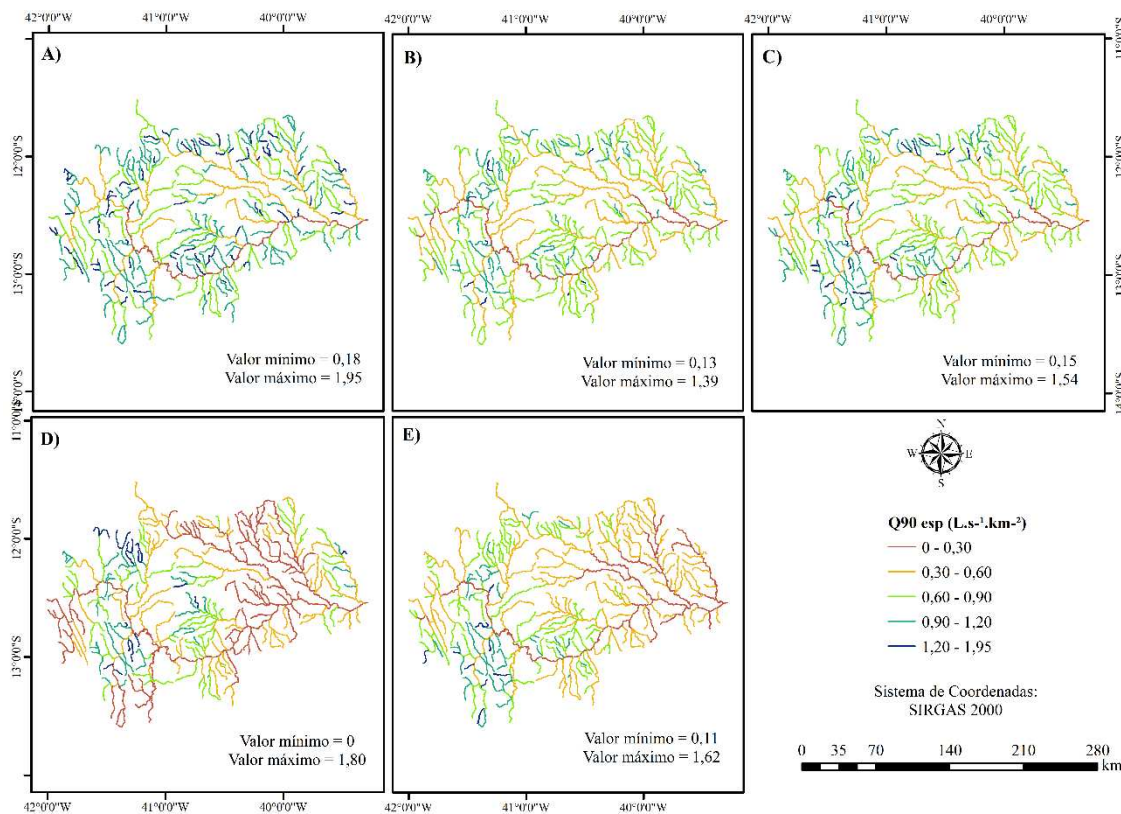


Figura 3.13 - Representação da variação da vazão específica ( $q_{90}$ ) ao longo da hidrografia, utilizando as variáveis: A (A) Peq<sub>IDW</sub> (B), Peq<sub>TC</sub> (C), BH<sub>IDW\_TC</sub> (D) e BH<sub>TC\_TC</sub> (E).

De acordo com a análise espacial da vazão específica regionalizada para a variável explicativa A (Figura 3.13 A), percebe-se a tendência das vazões mínimas em gerar maiores produções específicas nas menores áreas de drenagem e menores produções específicas em áreas de drenagem maiores. No entanto, como foi destacado em outros estudos (GONÇALVES

et al., 2018; REGO, 2013; RIBEIRO et al., 2005; PRUSKI et al., 2012), esse comportamento não é representativo das condições climáticas da bacia, visto que os maiores valores se concentram em menores áreas de drenagem, mesmo em regiões de menor balanço hídrico. Além disso, a variável A gerou maior frequência de trechos da classe de valores máximos (1,20 a 1,95 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) e o valor máximo estimado foi cerca de 3 vezes maior que o valor máximo observado nos dados das estações fluviométricas.

O comportamento da vazão específica regionalizada com as variáveis explicativas Peq<sub>IDW</sub> e Peq<sub>TC</sub> (Figuras 3.13 B e C) é caracterizado pela ocorrência da classe de maiores valores (1,20 a 1,95 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) na região oeste da bacia, principalmente na faixa da Chapada Diamantina, cuja ocorrência de chuvas de alta intensidade e volume são favorecidos pela altitude elevada (SELUCHI et al., 2011). Já os valores da classe intermediária (0,60 a 0,90 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) estão concentrados na parte central e ao leste da bacia hidrográfica. Observa-se que a distribuição espacial da q<sub>90</sub> obtida a partir das variáveis relacionadas à precipitação se difere da tendência apresentada pela variável A, e apresenta o comportamento correspondente às precipitações (PPT<sub>IDW</sub> e PPT<sub>TC</sub>) apresentadas na Figura 3.10.

No que se refere a amplitude das variáveis relacionadas à precipitação, observa-se que a utilização da variável Peq<sub>TC</sub> produziu maior amplitude (0,15 a 1,54 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) que a Peq<sub>IDW</sub> (0,13 a 1,39 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>). A distribuição espacial e as variações da magnitude de ambas variáveis ao longo da bacia hidrográfica, seguiram o padrão mostrado nos mapas de precipitação (Figura 3.10).

Apesar das variáveis Peq<sub>IDW</sub> e Peq<sub>TC</sub> produzirem estimativas com características correspondentes ao regime pluviométrico registrado na literatura, não abarcam os principais processos hidrológicos na bacia hidrográfica, como as abstrações decorrentes da evapotranspiração. Dessa forma, observa-se alta produção específica em regiões de clima semiárido, locais que gerariam menores valores se a ETR fosse considerada, e também acarretariam num menor balanço hídrico (BH). Nesse contexto, nas Figuras 3.13 (D e E) são apresentados os resultados obtidos com a utilização da variável BH.

Ao contrário das demais variáveis já apresentadas, a utilização da variável BH<sub>IDW\_TC</sub> (Figura 3.13 D) produziu variações mais condizentes com o comportamento hidrológico na bacia, registrando, predominantemente, valores da menor classe (0 a 0,30 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) na parte central, no semiárido, e maiores magnitudes (0,60 a 0,90 L s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) nas porções onde o balanço hídrico é maior. Nota-se também que as produções específicas diminuem à medida que se aproxima da foz e aumentam nas regiões com maior precipitação. Além disso, a anulação das áreas com valores negativos no BH ocasionou em vazões nulas nos respectivos locais, fato que

gera incerteza nos resultados e que não reflete completamente o processo de circulação da água na bacia hidrográfica.

O uso do  $BH_{TC\_TC}$  (Figura 3.13 E) como variável explicativa, foi caracterizado pelo decréscimo dos valores da  $q_{90}$ , num gradiente contínuo, da região oeste para leste. Além disso, o  $BH_{TC\_TC}$  conduziu a menores variações na distribuição espacial da  $q_{90}$  quando comparado com o  $BH_{IDW\_TC}$  e apresentou comportamento mais próximo da tipologia climática registrada na literatura (SOUSA 2016; MACEDO, 2013; TANAJURA et al., 2010; BAHIA, 1996).

Os maiores valores gerados com o uso do  $BH_{TC\_TC}$  ( $0,90$  a  $1,20 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ) ocorreram na região oeste da bacia hidrográfica, local que sofre influência do efeito orográfico (TANAJURA et al., 2010; SOUSA, 2016) e é caracterizado por precipitações de maior volume e intensidade em função do aumento da altitude (SELUCHI et al., 2011). A amplitude de variação das estimativas geradas com a utilização do  $BH_{TC\_TC}$  foi de  $0,11$  a  $1,62 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ .

Considerando o comportamento da vazão específica regionalizada com as diferentes variáveis explicativas, nota-se que o  $BH_{TC\_TC}$  foi a variável que melhor caracterizou as condições de clima e relevo na bacia hidrográfica, registrando as variações do efeito orográfico e do clima semiárido. Portanto, a variável  $BH_{TC\_TC}$  é a mais representativa das condições de circulação da água na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu e a mais recomendada para regionalização da vazão mínima.

### 3.3.5.3 Análise de risco

Na Figura 3.14 estão apresentados os mapas com a  $q_{90}$  regionalizada, de acordo com classificação da análise do risco associada às estimativas obtidas a partir do uso de variáveis independentes.

De acordo com a classificação de risco, observa-se a predominância da classe de potencial superestimativa para as variáveis A (66,9%),  $Peq_{TC}$  (53,1%) e  $Peq_{IDW}$  (58,6%). Para as variáveis  $BH_{TC\_TC}$  (33,6%) e  $BH_{IDW\_TC}$  (30,4%), os trechos classificados como potencial superestimativa ocorreram na região próxima ao efeito orográfico, cujos valores do balanço hídrico são maiores. Do ponto de vista da gestão e planejamento de recursos hídricos, é recomendável que a quantidade de trechos na classe de potencial superestimativa seja minimizada, de modo que sejam evitadas expectativas irreais da disponibilidade hídrica.

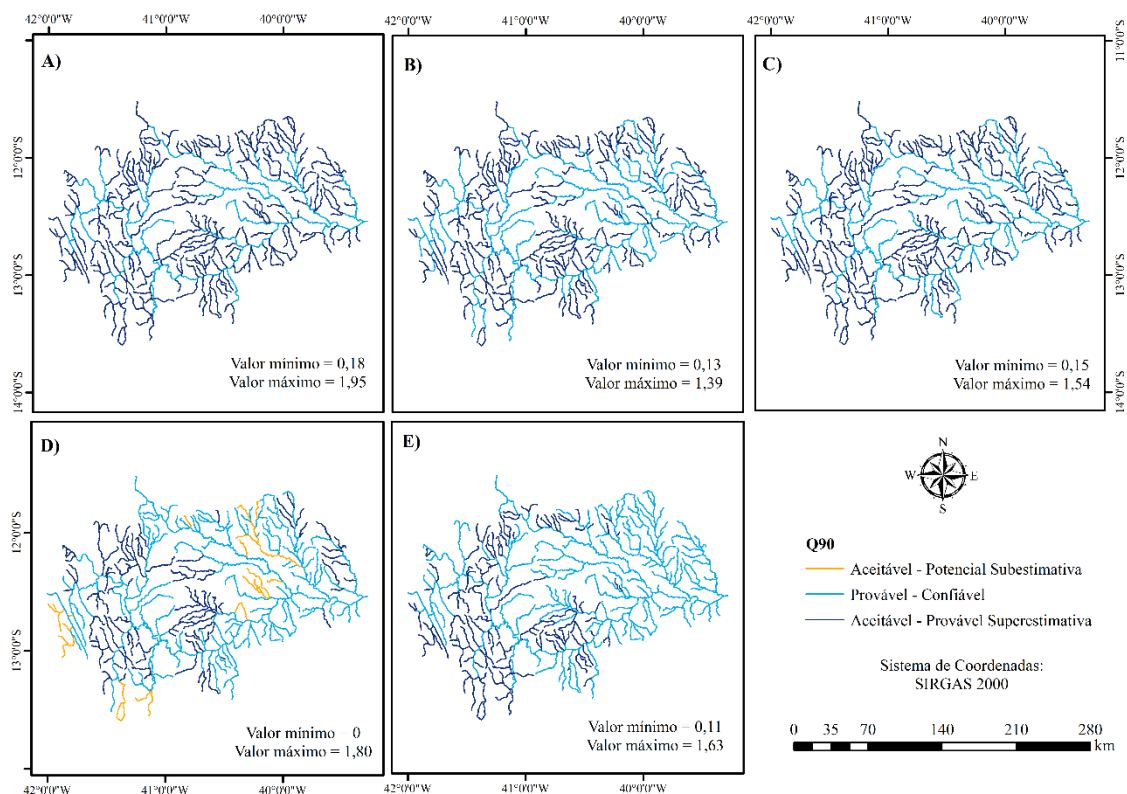


Figura 3.14 - Representação da classificação dos trechos da hidrografia na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu conforme o risco associado aos valores da vazão específica ( $q_{90}$ ) considerando as variáveis independentes A (A),  $Peq_{IDW}$  (B),  $Peq_{TC}$  (C),  $BH_{IDW\_TC}$  (D) e  $BH_{TC\_TC}$  (E).

Com relação à classe de valores confiáveis, nota-se que as variáveis  $BH_{TC\_TC}$  e  $BH_{IDW\_TC}$  foram as que apresentaram maior proporção de trechos, com 66,5% e 62,50%, respectivamente. Já as variáveis  $Peq_{IDW}$ ,  $Peq_{TC}$  e A apresentaram menores percentuais de trechos nessa classe, com 46,93%, 41,45% e 33,11%, respectivamente. Apesar dos valores na classe de valores confiáveis serem desejáveis, é importante que o modelo de regionalização produza estimativas que contemplem toda a faixa de variação observada, incluindo os valores mínimos e máximos. A ocorrência de valores superiores e inferiores ao máximo observado é provável, entretanto estão submetidos a maior incerteza e, portanto, devem ser minimizados.

Com relação a classe de potencial subestimativa, verifica-se que a variável  $BH_{IDW\_TC}$ , foi a única que gerou valores menores que os observados (7,14%), e além disso, valores nas três classes da análise de risco. Entretanto, os valores da classe de potencial subestimativa gerados pelo  $BH_{IDW\_TC}$  estão associados aos valores negativos no balanço hídrico, portanto, não constituem um aspecto positivo nessa análise. Destaca-se que a ocorrência de valores menores que o menor observado nas estações fluviométricas é provável e está a favor da segurança hídrica.

Mesmo com o baixo desempenho estatístico das equações de regionalização de vazões mínimas, a análise física evidenciou que o uso das variáveis  $BH_{TC\_TC}$  e  $BH_{IDW\_TC}$  conduziu a desempenhos similares e representativos para a regionalização de vazões. Contudo, considerando as discussões apresentadas nessas análises, entende-se que o  $BH_{TC\_TC}$  possui maior representatividade, conduzindo a menores incertezas e a resultados mais condizentes do ponto de vista físico e edafoclimático para o processo de regionalização da vazão mínima na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 3.4 CONCLUSÃO

A utilização de dados espaciais para a melhoria da estimativa da disponibilidade hídrica é muito importante, principalmente em regiões vulneráveis a seca, que caracterizam cenários críticos do ponto de vista do gerenciamento de recursos hídricos. Nesse sentido, o presente trabalho buscou o aprimoramento do método da regionalização de vazões por meio de variáveis explicativas que representassem o comportamento da vazão mínima numa bacia do semiárido brasileiro.

A regionalização pelo método de regressões regionais não possibilitou estimativas representativas da  $Q_{90}$  para toda a bacia do rio Paraguaçu, principalmente, devido ao pequeno número de estações fluviométricas e à baixa magnitude das vazões mínimas, havendo, inclusive, necessidade de exclusão da área de drenagem do seu principal afluente, rio Jacuípe. Diante dessa situação, recomenda-se a realização de estudos futuros com intuito de investigar a melhor alternativa de regionalização de vazões para bacias com essas características.

Os modelos obtidos para a regionalização da  $Q_{90}$  não apresentaram um bom desempenho estatístico, entretanto, nas análises física e de risco, constatou-se que a utilização do balanço hídrico obtido com dados do TerraClimate ( $BH_{TC\_TC}$ ) como variável explicativa conduziu a resultados representativos das vazões ao longo da hidrografia, sendo, portanto, a mais recomendada para a regionalização de vazões mínimas da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu.

### 3.5 REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.

- 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, 2014.
- BAHIA. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Médio e Baixo Rio Paraguaçu**. Volume VI - Documento Síntese. Superintendência de Recursos Hídricos. Governo do Estado da Bahia. p.195, 1996.
- 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, 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.
- 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.
- CARELLI, L.; SANTO, S. M. **Semeando águas no Paraguaçu** / organizadores: Ivana R. Lamas, S471 Luciana Santa Rita, Rogério Mucugê Miranda. – Rio de Janeiro: Conservação Internacional, Brasil, 2016.
- CECON, P. R.; SILVA, A. R. da; NASCIMENTO, M.; FERREIRA, A. Métodos estatísticos. Viçosa: Editora UFV, 229 p., 2012.
- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 43–51, 2002.
- 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, 2009.
- FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. Bulletin of the American Meteorological Society. **American Meteorological Society**, [s.l.], v. 62, n. 5, p.599-609, 1981.
- GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. Impacto das Mudanças Climáticas nas Vazões do rio Paraguaçu – Cenário A1B de 2011 a 2040. IN: **XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Anais. João Pessoa – PB, 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, 2017.
- GONÇALVES, C. J.; OLIVEIRA, M. C. A. de; OLIVEIRA, J. R. S. de; RIBEIRO, R. B. Estudo de regionalização de vazões para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba. **Sustentare**, v. 2, n. 2, p. 97–114, 2018.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN S.; YAPO P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments**. Cambridge University Press, 1997.

- 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, 2005.
- 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, 1999.
- 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, 2020.
- LI, Z.; LIU, W. Z.; ZHANG, X. C.; ZHENG, F. L. 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.
- MARENGO ORSINI, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973–1985, 2018.
- MEDEIROS, Y. Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 127–136, 2003.
- MOHEBZADEH, H.; FALLAH, M. Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 13, p. 389-400, 2019.
- 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.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte, CPRM, 552p., 2007.
- NETO, J. V.; DOS SANTOS, C. B.; TORRES, É. M.; ESTRELA, C. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**, v. 26, n. 76, p. 1–6, 2017.
- NOVAES, L. F. de; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. del G. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 1, p. 62-74, 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. Otimização do Aproveitamento da Disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 157-172, 2013.
- OLIVEIRA, J.R.S. **Aprimoramento do processo de regionalização de vazões visando o planejamento e a gestão de recursos hídricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 140p, 2019.

- 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, 1999.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. D. 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, 2013.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F de. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management - WRIM**, v. 1, n. 1, p. 51–59, 2012.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, P. L.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 830-838, 2016.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; SOUZA, J. F., SILVA, B.; SARAIVA, I. S. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural para a gestão dos recursos hídricos. **Eng. Agrícola Jaboticabal**, v. 31, n. 1, p. 67-77, 2011.
- RAO, A.R.; SRINIVAS, V.V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis, **Journal of Hydrology**. v.318, p.57-79. 2006.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 8, p. 958–975, 2013.
- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 53p., 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.
- RIBEIRO, R. B. **Critérios de valoração do uso da água considerando o manancial de captação subterrâneo e a regularização de vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- RIBEIRO, R. B. **Aprimoramento do processo de estimativa da disponibilidade hídrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.
- SELUCHI, M.E.; CHAN CHOU, S.; GRAMANI, M. A case study of a winter heavy rainfall event over the Serra do Mar in Brazil. **Geofísica internacional**, v. 50, n. 1, p. 41-56, 2011.
- SILVA, D. D.; MARQUES, F. de A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do Rio São Francisco. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 17, n. 5, p. 392-403, 2009.

- SILVA, S. F. Análise da disponibilidade e demanda frente a cenário de mudanças climáticas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, 2012.
- SOUSA, F., MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. D. S.; SILVA, V. The Standardized Precipitation Index (SPI) in identifying extreme rainfall and droughts in the Paraguaçu River Basin (BA). **Ambiência**, v. 12, n. 2, p. 707–719, 2016.
- SOUSA, H. T. DE. Sistema computacional para regionalização de vazões. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2009.
- SOUSA, J. R. C. **Hydrology Plus: sistema computacional para estudos meteorológicos e hidrológicos**. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 131p, 2017.
- SOUZA, R.; SOUZA, E. S. D.; ANTONINO, A. C.; LIMA, J. R. D. S. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 19, n. 5, p. 449-455, 2015.
- TANAJURA, C. A. S.; GENZ, F.; ARAÚJO, H. A. de. Mudanças climáticas e recursos hídricos na Bahia: validação da simulação do clima presente do HadRM3P e comparação com os cenários A2 e B2 para 2070-2100. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 345-358, 2010.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Hidrologia: ciência e aplicação, 2002.
- TUCCI, C. E. M., BRAGA, B., **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH. 348p, 2003.
- VAN LIEW, M. W., ARNOLD J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1539, 2003.
- WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series. 2a. Edition, EUA, **Academic Press**, v. 91, 627 p. 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, 2019.

## CONCLUSÃO GERAL

No presente trabalho foram avaliadas metodologias para o aprimoramento da estimativa das vazões, visando a maior representatividade das condições de circulação da água na bacia hidrográfica, sendo possível concluir que:

- Com relação ao Capítulo 1, a combinação dos dados de precipitação e evapotranspiração real oriundos do banco de dados TerraClimate (BH<sub>TC\_TC</sub>) possibilitou a melhoria da estimativa do balanço hídrico, uma vez que não produziu valores de balanço hídrico negativos e garantiu a maior representatividade do comportamento físico e climático da bacia hidrográfica.

- No Capítulo 2, dentre as variáveis avaliadas, o balanço hídrico com banco de dados do TerraClimate (BH<sub>TC\_TC</sub>) se sobressaiu, apresentando resultados estatísticos satisfatórios, comportamento físico mais coerente e representativo das condições de circulação da água na bacia hidrográfica e estimativas cujo risco associado foi predominantemente confiável, sendo mais seguras no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos.

- No Capítulo 3, a variável explicativa BH<sub>TC\_TC</sub>, balanço hídrico com banco de dados do TerraClimate, conduziu aos melhores resultados em todas as análises de desempenho, sendo, portanto, a mais recomendada para a regionalização de vazões mínimas.

## APÊNDICE A

Tabela A1 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu

<b>ID</b>	<b>Código</b>	<b>Nome da estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
1	51440000	Riachão do Jacuípe	-11,8067	-39,3867
2	51410000	França	-11,5531	-40,5947
3	51240000	Itaeté	-12,9861	-40,9581
4	51230000	Fazenda Iguaçu	-12,9361	-41,0644
5	51430000	Gavião II	-11,47	-39,7883
6	51280000	Iaçu	-12,7622	-40,2136
7	51460000	Ponte rio branco	-12,2331	-39,0461
8	51170000	Utinga	-12,5008	-41,2058
9	51120000	Andaraí	-12,8406	-41,3222
10	51190000	Fertém	-12,7572	-41,3289
11	51140000	Porto	-12,4911	-41,3289
12	51166000	Bonito	-12,3742	-41,1697
13	51350000	Argoim	-12,5856	-39,5222
14	51330000	Fazenda Santa Fé	-12,5156	-39,8481

Tabela A2 - ID, Código, nome, latitude e longitude das estações pluviométricas selecionadas para o estudo de regionalização de vazões da bacia hidrográfica do Paraguaçu

<b>ID</b>	<b>Código</b>	<b>Nome da estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
1	01241033	Usina Mucugê	-13,0075	-41,37
2	01241032	Guiné	-12,7664	-41,5361
3	01241028	Estação Experimental	-12,0192	-41,0547
4	01241027	Fazenda Ribeiro	-12,06	-41,3475
5	01241026	Utinga	-12,5019	-41,2078
6	01241017	Porto	-12,4975	-41,2961
7	01241008	Andaraí	-12,8017	-41,3275
8	01241006	Mucugê	-12,9833	-41,3667
9	01241003	Boninal (Guarani)	-12,71	-41,8253
10	01241001	Fazenda Iguaçu	-12,9347	-41,0658
11	01240016	Iaçu	-12,7622	-40,2108
12	01240012	Itaeté	-12,99	-40,9633
13	01239019	Santa Terezinha	-12,7667	-39,5333
14	01239017	Lajedo Alto	-12,7167	-39,8667
15	01239012	Jaguara	-12,1167	-39,1167
16	01239007	Argoim	-12,585	-39,5183

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

<b>ID</b>	<b>Código</b>	<b>Nome da estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
17	01140031	Barra Do Mundo Novo	-11,8656	-40,5178
18	01140010	França	-11,5533	-40,6
19	01139022	Gavião II	-13,4333	-41,1
20	01140000	Miguel Calmon (Djalma Dutra)	-11,4325	-40,6044
21	01140032	Açude Serrote	-11,4106	-40,3036
22	01141009	Barro Alto	-11,7667	-41,8833
23	01239010	Milagres	-12,9	-39,85
24	01242003	Fazenda Caraibas	-12,55	-42,0667
25	01242009	Olho D'água Do Francisco	-12,3061	-42,0919
26	01338007	Salvador - Ondina	-13,0167	-38,8833
27	01338009	Coroa	-13,0025	-38,6431
28	01339034	Nazaré	-13,0308	-39,0322
29	01340015	Nova Itarana	-13,0222	-40,0681
30	01341007	Contendas Do Sincora	-13,7667	-41,0333
31	01341029	Ituaçu	-13,8128	-41,3019
32	01339030	Mutuípe	-13,225	-39,5042
33	01141005	Ibitita (Rochedo)	-11,55	-41,9667
34	01441010	Cristalândia (Cristais)	-14,0161	-41,4436
35	01242002	Fazenda Covas	-12,8333	-42,4333
36	01238051	Teodoro Sampaio	-12,3003	-38,6439
37	01238042	Buracica	-12,2514	-38,515
38	01039019	Queimadas	-10,9742	-39,6328
39	01339041	Santa Inês	-13,2975	-39,8214
40	01140011	Gonçalo	-11,1892	-40,2664
41	01040015	Açude Serrinha	-10,95	-40,9333

Tabela A3 - Disponibilidade dos dados das estações pluviométricas

ID	Código	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013									
1	01240012																																																			
2	01241001																																																			
3	01240016																																																			
4	01339034																																																			
5	01241008																																																			
6	01241017																																																			
7	01339041																																																			
8	01239007																																																			
9	01140000																																																			
10	01338007																																																			
11	01238042																																																			
12	01339030																																																			
13	01140010																																																			
14	01039019																																																			
15	01238051																																																			
16	01341029																																																			
17	01241032																																																			
18	01241033																																																			
19	01139022																																																			
20	01140031																																																			
21	01241026																																																			
22	01241027																																																			
23	01338009																																																			
24	01140032																																																			
25	01241028																																																			
26	01140033																																																			
27	01239010																																																			
28	01340015																																																			
29	01141009																																																			
30	01141005																																																			
31	01241006																																																			
32	01242003																																																			
33	01341007																																																			
34	01140011																																																			
35	01441010																																																			
36	01239012																																																			
37	01239017																																																			
38	01239019																																																			
39	01241003																																																			
40	01242009																																																			
41	01040015																																																			

Dados consistidos  
 Dados não-consistidos  
 Ausência de dados