

**Cristiane Julio Gonçalves,**  
Engenheira Ambiental. Mestranda em  
Meteorologia Aplicada. Universidade Federal  
de Viçosa  
[cristianegoncalvesj@gmail.com](mailto:cristianegoncalvesj@gmail.com)

**Anna Carolina Martins de Oliveira**  
Engenheira Ambiental.  
Universidade Federal de Viçosa  
[anna.martinsdeoliveira@gmail.com](mailto:anna.martinsdeoliveira@gmail.com)

**Josiane Rosa Silva de Oliveira**  
Engenheira Agrícola e Ambiental. Mestre e  
doutoranda em Engenharia Agrícola, na área de  
Recursos Hídricos e Ambientais.  
Professora na Universidade Federal de Viçosa  
[josianerso@gmail.com](mailto:josianerso@gmail.com)

**Rayssa Balieiro Ribeiro**  
Engenheira Agrícola e Ambiental. Mestre e  
doutoranda em Engenharia Agrícola, na área de  
Recursos Hídricos e Ambientais. Universidade  
Federal de Viçosa  
[rayssabalieiro@gmail.com](mailto:rayssabalieiro@gmail.com)

## ESTUDO DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA

**Resumo:** O conhecimento da disponibilidade hídrica é de fundamental importância e, normalmente, é obtido através das séries históricas de vazão nas estações fluviométricas. Entretanto, além das estações não cobrirem toda a hidrografia, em muitas regiões elas apresentam baixa densidade, má distribuição espacial e/ou apresentam problemas de operação. A regionalização de vazões é uma das alternativas para suprir a necessidade de informações, pois permite a obtenção de variáveis hidrológicas ao longo da hidrografia. O objetivo do trabalho foi realizar estudo de regionalização da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) e das vazões mínimas ( $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$ ) para a bacia do rio Paranaíba. Utilizou-se a técnica de regionalização baseada em regressões regionais que requer a divisão da bacia em regiões hidrologicamente homogêneas (RHH), obtidas por análise de cluster. Foram testados os modelos de regressão linear e potencial. As variáveis dependentes utilizadas foram a  $Q_{mld}$  e as vazões mínima de referência para outorga para os rios de dominialidades da União ( $Q_{95}$ ) e dos estados onde a bacia está inserida, Minas Gerais ( $Q_{7,10}$ ), Goiás e Mato Grosso ( $Q_{90}$ ). As variáveis independentes foram área de drenagem, precipitação convertida na vazão equivalente ao volume precipitado ( $Peq$ ) e vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração de 750 mm ( $Peq_{750}$ ). A análise de cluster juntamente com a avaliação da distribuição espacial das estações fluviométricas agrupadas resultou na divisão da bacia em quatro RHH. Observou-se que o modelo potencial apresentou melhores resultados e a variável explicativa  $Peq_{750}$  melhor desempenho físico e estatístico para três das regiões.

**Palavras-chave:** Vazão mínima. Vazão média. Disponibilidade hídrica. Regiões homogêneas. Regressões regionais.

## STREAMFLOW REGIONALIZATION IN PARANAÍBA RIVER BASIN

**Abstract:** Knowledge of water availability is of prime importance and is usually obtained through historical data of streamflow gauges. However, streamflow gauges don't cover the entire hydrography, and, in many regions, they show low density, poor spatial distribution and/or have operational issues. Streamflow regionalization is one of the alternatives to cater for the need of information since it allows the obtainment of hydrological variables throughout hydrography. The goal of this paper was to perform regionalization studies of long-term average flow ( $Q_{mld}$ ) and low flows ( $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$ ) for Paranaíba river basin. The regionalization method used was based on dividing the basin into hydrologically homogeneous regions (RHH) obtained by cluster analysis. Linear and potential regression functions were tested. Dependent variables were  $Q_{mld}$  and reference low flows for water grant on jurisdiction over state rivers, Minas Gerais ( $Q_{7,10}$ ), Goiás

and Mato Grosso ( $Q_{90}$ ); and federal rivers ( $Q_{95}$ ), where the basin is included. Independent variables were drainage area, streamflow equivalent to the annual rainfall volume ( $Peq$ ), and streamflow equivalent to the annual rainfall volume minus the abstraction factor ( $Peq_{750}$ ). Cluster analysis herewith spatial distribution evaluation of fluviometric stations resulted in the basin's division into four RHH. The study demonstrated that potential function showed the best results and  $Peq_{750}$  the best physical and statistical performance for three of the regions.

**Keywords:** Minimum flow. Average flow. Water availability. Homogeneous regions. Regional regressions.

---

Recebido em: 02/11/2018 - Aprovado em: 19/11/2018 - Disponibilizado em: 11/12/2018

---

## INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade dos recursos hídricos é de fundamental importância, uma vez que a relação entre oferta e demanda deve ser balanceada, de forma a não comprometer as características naturais da hidrografia.

A disponibilidade hídrica pode ser caracterizada de duas formas: natural, representada pelas vazões mínimas, e potencial, determinada pelas vazões médias de longa duração.

A obtenção dessas informações é realizada a partir da análise de dados de estações fluviométricas, que de acordo com Lima (2001), apresentam cobertura inadequada, principalmente em países em desenvolvimento. E, mesmo que houvesse uma alta densidade de estações, a rede hidrométrica não é capaz de cobrir todos os pontos da hidrografia.

Tendo em vista a falta de informações e a necessidade de supri-la,

utiliza-se a regionalização de vazões, uma técnica de fundamental importância para compensar essa deficiência (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Fill (1987), em sentido amplo, entende-se por regionalização hidrológica qualquer processo de transferência de informações das estações hidrométricas para outros locais sem observações.

Os métodos mais empregados para a regionalização de vazões são os que utilizam a “transferência de equações e parâmetros relacionados com a estatística” (ELETROBRÁS, 1985). Dentre estes métodos, se destaca o método das regressões regionais, o qual se baseia na identificação de regiões hidrológicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão que relacionam as características físicas e climáticas da bacia com os processos hidrológicos.

Entretanto, segundo Li et al. (2009), somente a análise estatística dos modelos de

regionalização não é suficiente para estimar as vazões ao longo da hidrografia. Para adequada quantificação da disponibilidade hídrica, por meio de estudos de regionalização é importante que se considere a real complexidade do processo. Assim, o uso de procedimentos que auxiliem na compreensão do comportamento físico das vazões é importante para extrair maiores informações dos dados disponíveis (Nunes et al, 2013).

Segundo Pruski & Pruski (2011), estudos de regionalização que reflitam a real complexidade do processo devem considerar o uso de variáveis que ajudem a descrever o comportamento físico do sistema natural, levando em conta as abstrações relacionadas ao processo de formação das vazões, e o uso de modelos que permitam a extrapolação das equações de regionalização de forma segura para todos os trechos da hidrografia.

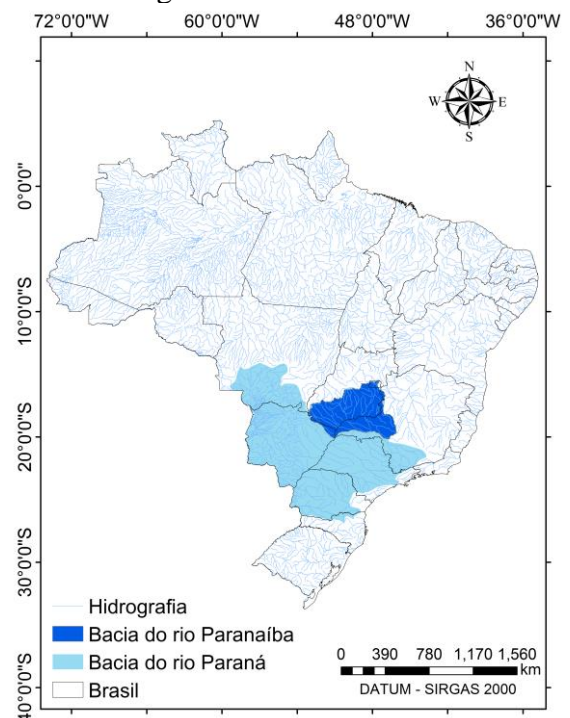
Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar estudo de regionalização da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ), das mínimas associadas à permanência de 90% ( $Q_{90}$ ) e de 95% ( $Q_{95}$ ) no tempo e da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ).

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Paranaíba (Figura 1) é a segunda maior unidade hidrográfica da Região Hidrográfica do Paraná, está localizada entre paralelos 15° e 20° de latitude sul e os meridianos 45° e 53° de longitude oeste, drena uma área de mais de 220.000 km<sup>2</sup>. A bacia abrange os estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal, que correspondem a 63,3%, 31,7%, 3,4% e 1,6% da área total da bacia, respectivamente (CBH- Paranaíba, 2017).

**Figura 1** - Localização da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba.



A bacia do rio Paranaíba se caracteriza, segundo a classificação climática de Köppen, pelo tipo “Aw”, que corresponde ao clima tropical quente em todas as estações do ano (temperatura média

mensal maior ou igual a 18° C) com inverno seco, não havendo variações extremas de precipitação e evapotranspiração entre as Unidades de Gestão Hídrica da bacia (OLIVEIRA, 2017). O regime hidrológico dos rios desta bacia é regulado pela estação das chuvas (entre outubro e março), bem demarcada nesta região do Brasil, e nos demais seis meses do ano as chuvas são rarefeitas (CBH-Paranaíba, 2017).

O agronegócio é uma das principais atividades da região. Em termos de produção agrícola, as maiores produções da região são a soja, o milho e a cana-de-açúcar. Já em relação a pecuária, os principais rebanhos são os bovinos, aves e suínos (PRH-Paranaíba, 2011).

### **Dados utilizados**

Foram utilizadas séries históricas com dados consistidos, de 73 estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional das Águas – ANA, tendo sido estes dados adquiridos em 23 de setembro de 2017. Na Figura 2 é apresentado o mapa com a localização das estações e na Tabela 1 as informações relativas ao Id, ao código, ao nome, à

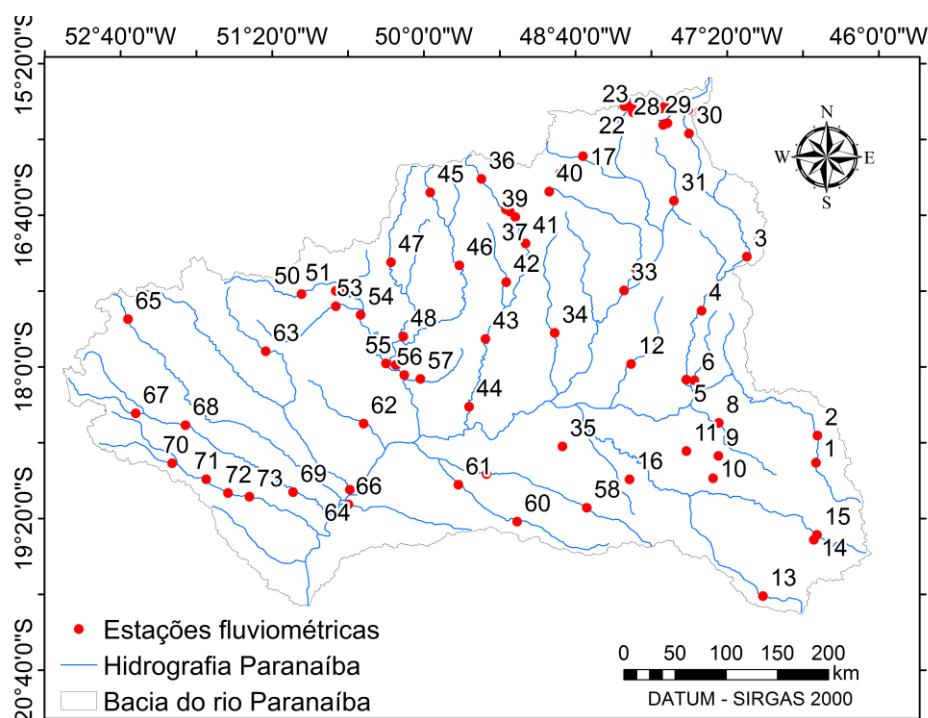
latitude, à longitude, obtidas no HidroWeb; e a área das estações.

A área foi obtida através de ferramentas de geoprocessamento utilizando o Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado gerado a partir do produto RTC (Radiometrically Terrain-Corrected) com resolução de 12,5 m proveniente da plataforma ALOS (Advanced Land Observing Satellite) sensor PALSAR (Phse Array type L-band Synthetic Aperture Radar). Esse produto é um projeto do Alaska Satellite Facility, que disponibiliza dados SAR (Synthetic Aperture Radar) corrigidos no âmbito geométrico e radiométrico (FILGUEIRAS et al., 2018).

O período base foi selecionado para que as estações fluviométricas apresentassem no mínimo 20 anos com mais de 95% dos dados, sendo definido o período de 1976 a 2006.

Para a espacialização das vazões regionalizadas para cada trecho do curso d'água foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013 (versão 1.3 de 22/07/2014), na escala 1:250.000, obtida no banco de dados da Agência Nacional das Águas (Metadados da ANA)

**Figura 2** - Localização das estações fluviométricas na bacia do Rio Paranaíba.



**Tabela 1** - Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Id	Código	Estação	Latitude	Longitude	Área (km <sup>2</sup> )
1	60010000	Santana de Patos	-18,841	-46,551	2733,37
2	60011000	Patos de Minas	-18,602	-46,539	3796,42
3	60020000	Ponte São Marcos	-17,029	-47,159	4423,89
4	60030000	Campo Alegre de Goiás	-17,504	-47,557	8382,83
5	60040000	Fazenda São Domingos	-18,111	-47,692	10746,20
6	60050000	Davinópolis	-18,117	-47,62	920,81
7	60100000	Charqueada do Patrocínio	-18,901	-46,966	78,28
8	60110000	Abadia dos Dourados	-18,491	-47,406	1951,77
9	60130000	Fazenda Cachoeira	-18,781	-47,409	130,88
10	60145000	Iraí de Minas	-18,978	-47,456	91,83
11	60150000	Estrela do Sul	-18,738	-47,690	872,55
12	60200000	Estação Veríssimo	-17,973	-48,177	3178,68
13	60220000	Desemboque	-20,014	-47,017	1067,41
14	60250000	Fazenda São Mateus	-19,518	-46,570	1300,98
15	60265000	Ibiá	-19,475	-46,542	1364,41
16	60381000	Fazenda Letreiro	-18,988	-48,190	773,49
17	60430000	Ponte Anápolis – Brasília	-16,146	-48,602	1649,92
18	60432000	Ribeirão das Antas	-16,298	-48,803	223,08
19	60435000	Descoberto - Chácara 89	-15,708	-48,235	114,71
20	60435100	Chapadinha - Aviário - DF 180	-15,699	-48,212	18,83
21	60435200	Rodeador - DF 435	-15,725	-48,168	109,71
22	60435300	Capão Comprido- Descoberto	-15,746	-48,163	15,54
23	60435400	Ribeirão das Pedras -DF-180	-15,761	-48,160	74,98
24	60476100	DF-06 / DF 250	-15,741	-47,674	691,53
25	60477200	Três Barras - Jusante Santa Maria	-15,666	-47,953	39,20
26	60477400	Torto - Lago (Montante Paranoá)	-15,712	-47,878	232,99
27	60477600	Bananal - Epia 003	-15,727	-47,910	129,95
28	60478500	Gama - Base Aérea	-15,871	-47,896	135,28
29	60478600	Dom Bosco - Cabeça de Veado	-15,856	-47,857	31,24

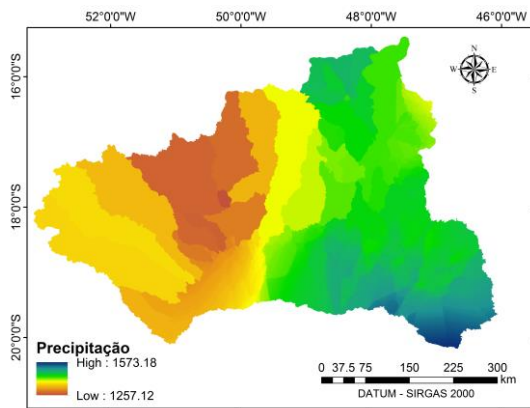
**Tabela 1** - Estações fluviométricas utilizadas no estudo (Continuação)

<b>Id</b>	<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
30	60490000	DF-18 / BR 251	-15,947	-47,668	2127,37
31	60500000	Uhe Batalha Rio São Bartolomeu	-16,538	-47,800	4123,25
32	60540000	Uhe Corumbá I Rio Piracanjuba	-17,131	-48,137	3678,30
33	60545000	Pires do Rio	-17,327	-48,239	20689,20
34	60590000	Fazenda Papua	-17,700	-48,850	2364,77
35	60615000	Fazenda Cachoeira	-18,698	-48,781	194,43
36	60635000	Inhumas	-16,346	-49,494	532,46
37	60640000	Montante de Goiânia	-16,614	-49,280	1740,12
38	60642000	Captação João Leite	-16,632	-49,244	759,76
39	60650000	Jusante de Goiânia	-16,681	-49,196	2833,05
40	60653000	Ribeirão das Caldas	-16,458	-48,897	51,47
41	60654000	Fazenda Sucuri	-16,914	-49,105	1292,03
42	60665000	Professor Jamil	-17,254	-49,275	1200,37
43	60675000	Aloândia	-17,753	-49,458	9587,62
44	60680000	Ponte Meia Ponte	-18,349	-49,602	11501,29
45	60700000	Anicuns	-16,465	-49,943	561,96
46	60715000	Fazenda Boa Vista	-17,107	-49,688	4639,07
47	60750000	Fazenda Nova do Turvo	-17,079	-50,289	2641,18
48	60765000	Barra do Monjolo	-17,732	-50,181	7871,64
49	60772000	Fazenda Santa Maria	-17,981	-50,247	17255,84
50	60774000	Montividiu	-17,359	-51,075	1016,19
51	60778000	Fazenda Monte Alegre	-17,331	-50,774	807,19
52	60781000	Ponte Rodagem	-17,326	-50,682	5951,50
53	60785005	Fazenda Paraíso	-17,466	-50,774	1168,98
54	60790000	Ponte Rio Verdão	-17,541	-50,556	8755,02
55	60798000	Maurilândia	-17,968	-50,333	12792,60
56	60805000	Ponte Sul Goiana	-18,071	-50,172	30670,00
57	60810000	Fazenda Aliança	-18,105	-50,031	1357,37
58	60835000	Fazenda Paraíso	-19,237	-48,567	1538,72
59	60845000	Ituiutaba	-18,941	-49,450	6309,78
60	60850000	Fazenda Buriti do Prata	-19,360	-49,180	2450,42
61	60855000	Ponte do Prata	-19,035	-49,697	5224,48
62	60870000	Quirinópolis	-18,498	-50,529	1629,23
63	60895000	Ponte Rio Doce	-17,861	-51,390	1283,01
64	60907000	Fazenda Rondinha	-19,079	-50,651	13591,26
65	60910000	Ponte do Cedro	-17,579	-52,601	642,80
66	60925001	Ponte São Domingos	-19,208	-50,663	3509,94
67	60930000	Fazenda Formoso	-18,407	-52,533	1471,74
68	60940000	Campo Alegre	-18,512	-52,096	3159,00
69	60950000	Canastra	-19,100	-51,149	6770,99
70	60960000	Barra do Prata	-18,845	-52,213	1205,25
71	60965000	Aporé	-18,986	-51,913	4062,99
72	60968000	Cassilândia	-19,108	-51,721	4712,02
73	60970000	Itajá	-19,140	-51,534	5237,58

Os valores de precipitação total anual média ao longo da bacia do rio Paranaíba, foram obtidos a partir do mapa de precipitação (Figura 3) apresentado no “Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no

Estado de Minas Gerais” (GPRH; IGAM, 2012), que considerou 82 estações pluviométricas com no mínimo 20 anos de dados com mais de 95% dos dados, sendo definido o período de 1976 a 2005.

**Figura 3** - Mapa de precipitação para a bacia do Rio Paranaíba.



Fonte: IGAM, 2012

### Identificação das regiões homogêneas

O método de regionalização de vazões empregado foi o das regressões regionais, cujo procedimento para aplicação envolve, inicialmente, a definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas.

Para a definição dessas regiões, foi utilizada a análise de agrupamentos, também conhecida como análise de cluster ou de conglomerados, considerando o método K-means e a distância euclidiana generalizada, como medida de similaridade/dissimilaridade entre os objetos.

Visando encontrar a melhor configuração de grupos para definição das regiões hidrologicamente homogêneas, avaliou-se a consideração de 2, 3, 4 e 5 agrupamentos, com as vazões médias mensais nas estações fluviométricas e as informações geográficas (latitude e longitude) dessas estações como variáveis para a análise.

Considerando o fato de que as variáveis apresentam diferentes unidades e escalas, foi feita a normalização antes da aplicação do método de agrupamento. Além disso, foi aplicado recurso da estatística descritiva que identifica *outliers* em uma distribuição de dados, o *Box Plot*, para a exclusão de estações fluviométricas com comportamento inconsistente, ou seja, que possam conter informações hidrológicas discrepantes em relação ao conjunto de dados da bacia em que se encontram.

Os grupos formados foram avaliados pelas medidas de discordância e de heterogeneidade, estatisticamente baseadas em momentos-L, conforme descrição de Hosking e Wallis (1997). A medida de discordância foi aplicada com a finalidade de identificar, dentro dos grupos formados, estações com características estatísticas muito discrepantes das demais e a medida de heterogeneidade foi usada para avaliar o grau de heterogeneidade de uma região pela comparação entre a variabilidade amostral observada e a variabilidade esperada para uma região homogênea.

### Obtenção das equações de regionalização

A segunda etapa do processo de regionalização de vazões pelo método das regressões regionais envolve a obtenção das equações que permitam associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas nas

regiões definidas. Neste estudo foram utilizados os modelos de regressão linear e potencial.

As variáveis dependentes analisadas no estudo foram a  $Q_{mld}$ , a  $Q_{90}$ , a  $Q_{95}$  e a  $Q_{7,10}$ . Todas essas foram obtidas, para as estações fluviométricas, utilizando o programa SisCAH 1.0 - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SOUSA, 2009).

A área e a precipitação foram utilizadas com o intuito de representar as características físicas e climáticas da bacia, respectivamente. A área foi considerada individualmente e associada a precipitação, buscando uma representação bidimensional da relação entre as variáveis dependentes e independentes, conforme sugerido por (PRUSKI et al., 2012 e PRUSKI et al., 2013).

A associação da área com a precipitação foi feita pelo uso da vazão equivalente ao volume precipitado (equação 1) e da vazão equivalente levando em consideração um fator de abstração da precipitação igual a 750 mm (equação 2). Este fator visa contemplar a parte da precipitação que não é convertida em escoamento ao longo da hidrografia em decorrência de outros processos, sobretudo a evapotranspiração (PRUSKI et al., 2012).

$$Peq = \frac{P A}{31.536} \quad (1)$$

em que:  $Peq$  = vazão equivalente ao volume precipitado,  $m^3 s^{-1}$ ;  $P$  = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm;  $A$  = área de drenagem,  $km^2$ ; e 31.536 é uma constante utilizada para converter  $P$  em metros e  $A$  em metros quadrados, divididos pelo número de segundos no ano.

$$Peq_{750} = \frac{(P - 750) A}{31.536} \quad (2)$$

em que:  $Peq_{750}$  = vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração do fator de abstração igual a 750 mm,  $m^3 s^{-1}$ .

### Análise de desempenho estatístico

Uma vez obtidas as equações de regionalização, procedeu-se a seleção da equação que conduziu à condição mais representativa das vazões para a bacia. Para tal, foram analisados os melhores ajustes estatísticos, com base no maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) (equação 3), menor erro padrão (equação 4) e menores amplitudes dos valores dos resíduos (equação 5).

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (3)$$

em que:  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $SQR$  = soma dos quadrados da regressão; e  $SQT$  = soma dos quadrados totais;



$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{reg})^2}{n - 2}} \quad (4)$$

em que:  $s_e$  = erro padrão;  $Q_{obs}$  = vazão observada na estação fluviométrica;  $Q_{reg}$  = vazão estimada pelo modelo de regionalização; e  $n$  = tamanho amostral.

$$ER = \frac{(Q_{obs} - Q_{reg})}{Q_{obs}} \times 100 \quad (5)$$

em que ER é o erro relativo (resíduos).

### Análise de desempenho físico

As equações de regionalização tendem a apresentar grande amplitude de variação nas regiões nas quais a extrapolação é feita, podendo conduzir a superestimativas das vazões. Para minimizar este risco Pruski et al. (2015) e Pruski et al. (2016) propõem a imposição de uma restrição física para a estimativa das vazões mínimas e médias em regiões de extrapolação das equações de regionalização e correspondente a um valor limite. Para a vazão média esse valor é correspondente ao maior coeficiente de escoamento (equação 6) e para as mínimas às maiores vazões específicas (equação 7) observadas nas estações fluviométricas na região hidrologicamente homogênea correspondente.

$$CE = \frac{V_{T(\text{escoado})}}{V_{T(\text{precipitado})}} \quad (6)$$

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

$$q_{min} = \frac{Q_{min}}{A} \quad (7)$$

em que:  $q_{min}$  = vazão específica mínima;  $Q_{min}$  = vazão mínima,  $L s^{-1}$ ; e  $A$  = área de drenagem,  $km^2$ .

Para os casos em que o coeficiente de escoamento estimado no trecho da base hidrográfica foi maior que o valor limite, a vazão média de longa duração foi estimada pela equação:

$$Q_{mld\_ajust} = CE_{lim} \times Peq \quad (8)$$

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

Procedimento similar foi utilizado para as vazões mínimas, sendo estimadas pela equação:

$$Q_{mín\_ajust} = q_{mín\_lim} \times A \quad (9)$$

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

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

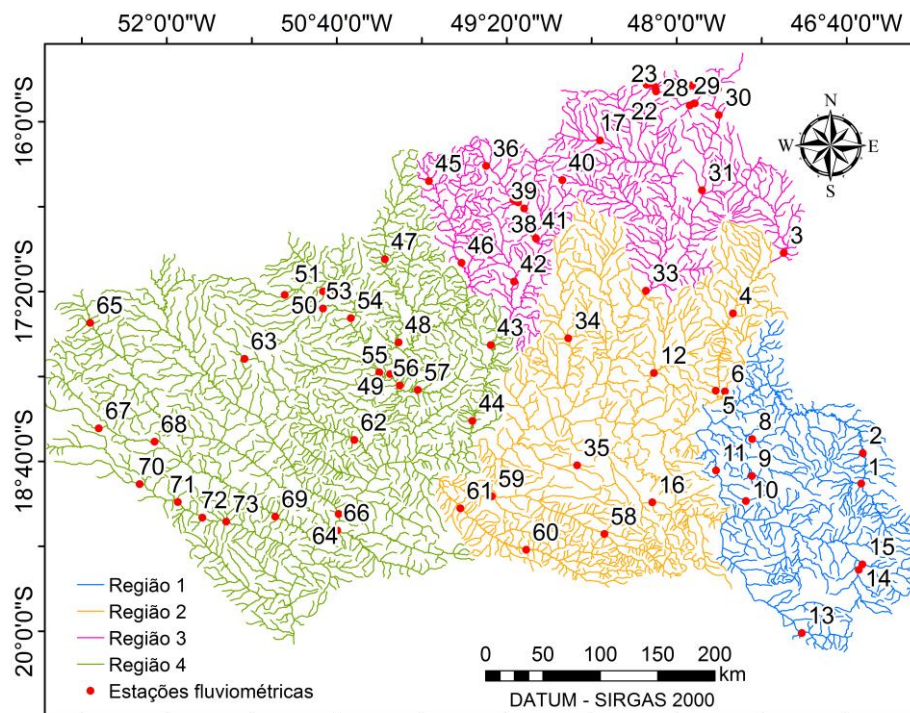
### Identificação das regiões homogêneas

Pela análise do *Box Plot* do coeficiente de escoamento, constatou-se

que as estações 60100000 e 60477200 foram caracterizadas como “*outliers*” e, portanto, desconsideradas nesta etapa.

A divisão da bacia em quatro grupos apresentou melhor resultado na análise cluster e as medidas de discordância e de heterogeneidade resultaram na consideração das regiões formadas como hidrológicamente homogêneas (RHH) (Figura 4).

**Figura 4** - Regiões hidrológicamente homogêneas na bacia do rio Paranaíba



### Obtenção dos modelos de regionalização

Definidas as regiões homogêneas, realizou-se uma análise de *Box Plot* em

cada região. A partir disso, as estações 60100000 e 60477200 foram caracterizadas como outliers para as

regiões 1 e 3, respectivamente, e eliminadas dessa etapa.

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentados os indicadores estatísticos obtidos para as equações de regressão

ajustadas com os modelos linear e potencial, considerando as variáveis independentes analisadas, em cada região hidrologicamente homogênea, para cada vazão analisada.

**Tabela 2** – Indicadores estatísticos para equações de regressão obtidas para  $Q_{mld}$

Região homogênea	Variável	R <sup>2</sup> ajustado		Erro padrão		Amplitude do resíduo	
		Linear	Potencial	Linear	Potencial	Linear	Potencial
RHH 1	A	0,947	0,979	4,966	0,200	185,476	50,575
	Peq	0,957	0,984	4,475	0,176	158,200	52,767
	Peq <sub>750</sub>	0,966	0,988	3,965	0,153	131,288	46,517
RHH 2	A	0,991	0,996	5,819	0,082	93,697	26,236
	Peq	0,989	0,996	6,431	0,080	111,445	27,616
	Peq <sub>750</sub>	0,986	0,995	7,355	0,084	46,061	29,199
RHH 3	A	0,995	0,988	5,146	0,203	384,173	96,407
	Peq	0,996	0,989	4,125	0,193	255,402	97,952
	Peq <sub>750</sub>	0,998	0,990	3,216	0,186	119,576	99,801
RHH 4	A	0,952	0,914	21,844	0,318	263,274	187,678
	Peq	0,951	0,912	22,087	0,321	258,202	194,647
	Peq <sub>750</sub>	0,946	0,908	23,110	0,329	258,930	207,606

**Tabela 3** – Indicadores estatísticos para equações de regressão obtidas para  $Q_{90}$

Região homogênea	Variável	R <sup>2</sup> ajustado		Erro padrão		Amplitude do resíduo	
		Linear	Potencial	Linear	Potencial	Linear	Potencial
RHH 1	A	0,671	0,910	3,439	0,408	501,943	113,484
	Peq	0,692	0,918	3,329	0,389	485,003	108,378
	Peq <sub>750</sub>	0,713	0,926	3,215	0,370	459,698	103,190
RHH 2	A	0,972	0,981	3,136	0,160	50,138	50,737
	Peq	0,976	0,982	2,897	0,154	65,738	48,062
	Peq <sub>750</sub>	0,980	0,983	2,683	0,150	81,845	45,263
RHH 3	A	0,988	0,946	2,657	0,452	883,581	391,515
	Peq	0,991	0,946	2,322	0,450	767,176	398,847
	Peq <sub>750</sub>	0,993	0,946	2,010	0,451	634,858	407,546
RHH 4	A	0,733	0,739	21,396	0,551	359,176	308,051
	Peq	0,734	0,743	21,341	0,547	361,296	313,185
	Peq <sub>750</sub>	0,733	0,747	21,367	0,543	364,760	320,266

**Tabela 4** – Indicadores estatísticos para equações de regressão obtidas para  $Q_{95}$

Região homogênea	Variável	R <sup>2</sup> ajustado		Erro padrão		Amplitude do resíduo	
		Linear	Potencial	Linear	Potencial	Linear	Potencial
RHH 1	A	0,586	0,889	3,439	0,466	501,943	131,531
	Peq	0,607	0,899	3,329	0,446	485,003	126,245
	Peq <sub>750</sub>	0,629	0,907	3,215	0,426	459,698	120,864
RHH 2	A	0,962	0,974	3,063	0,183	53,244	59,459
	Peq	0,968	0,976	2,836	0,177	68,576	56,797
	Peq <sub>750</sub>	0,973	0,977	2,615	0,172	84,647	54,017
RHH 3	A	0,986	0,941	2,447	0,482	1160,225	423,230
	Peq	0,989	0,941	2,193	0,480	1012,743	431,294
	Peq <sub>750</sub>	0,991	0,941	1,961	0,481	845,167	440,861
RHH 4	A	0,674	0,697	20,983	0,604	403,639	336,001

Peq	0,676	0,702	20,933	0,599	405,896	341,545
Peq <sub>750</sub>	0,676	0,707	20,940	0,594	409,572	349,183

**Tabela 5** – Indicadores estatísticos para equações de regressão obtidas para Q<sub>7,10</sub>

Região homogênea	Variável	R <sup>2</sup> ajustado		Erro padrão		Amplitude do resíduo	
		Linear	Potencial	Linear	Potencial	Linear	Potencial
RHH 1	A	0,431	0,850	2,853	0,598	1088,528	173,379
	Peq	0,452	0,861	2,798	0,577	1041,332	167,453
	Peq <sub>750</sub>	0,475	0,871	2,740	0,555	993,014	161,399
RHH 2	A	0,940	0,957	2,626	0,236	65,686	73,809
	Peq	0,948	0,959	2,455	0,232	74,600	71,235
	Peq <sub>750</sub>	0,955	0,960	2,278	0,228	85,441	68,557
RHH 3	A	0,978	0,925	2,248	0,572	2284,732	509,407
	Peq	0,981	0,925	2,066	0,571	1995,125	519,702
	Peq <sub>750</sub>	0,984	0,925	1,893	0,571	1734,617	531,921
RHH 4	A	0,519	0,562	19,941	0,760	710,407	545,859
	Peq	0,520	0,568	19,907	0,756	713,820	554,423
	Peq <sub>750</sub>	0,521	0,573	19,898	0,751	719,342	566,239

De acordo com os resultados apresentados para os dois modelos de regressão, observou-se que para todas as situações analisadas, os valores de erro padrão e amplitude do resíduo foram menores para o modelo potencial e, em relação ao R<sup>2</sup>, o modelo linear apresentou valores ligeiramente superiores para todas as variáveis na região 3 e para a Q<sub>mld</sub> na região 4.

Analisando de forma conjunta todos os índices estatísticos, considerou-se o modelo potencial como o de melhor desempenho. Levando-se em conta os índices estatísticos associados a esse modelo e às variáveis independentes utilizadas, tem-se que: para a Q<sub>mld</sub> a Peq<sub>750</sub> apresentou os melhores ajustes para as regiões 1, 2 e 3 e a A apresentou melhor ajuste para a região 4; para a Q<sub>90</sub> e Q<sub>95</sub>, a Peq<sub>750</sub> apresentou os melhores ajustes para todas as regiões; e para a Q<sub>7,10</sub>, a Peq<sub>750</sub>

apresentou os melhores ajustes para as regiões 1, 2 e 4 e a Peq apresentou os melhores ajustes para a região 3. Apesar disso, considerando que as diferenças não foram expressivas e que a Peq<sub>750</sub> é uma variável mais representativa do processo físico de formação de vazões, por combinar características climáticas e física em uma única variável, optou-se por adotá-la como variável explicativa para a regionalização de vazões na bacia do Paranaíba.

As equações de regionalização estão apresentadas nas equações 10 a 25.

$$Q_{mld\_RHH1} = 0,7978 \times Peq_{750}^{0,9973} \quad (10)$$

$$Q_{mld\_RHH2} = 0,7449 \times Peq_{750}^{0,9967} \quad (11)$$

$$Q_{mld\_RHH3} = 0,8440 \times Peq_{750}^{0,9672} \quad (12)$$

$$Q_{mld\_RHH4} = 1,1534 \times Peq_{750}^{0,9341} \quad (13)$$

$$Q_{90\_RHH1} = 0,31080 \times P_{eq750}^{0,9486} \quad (14)$$

$$Q_{90\_RHH2} = 0,3196 \times P_{eq750}^{0,9277} \quad (15)$$

$$Q_{90\_RHH3} = 0,2588 \times P_{eq750}^{0,9864} \quad (16)$$

$$Q_{90\_RHH4} = 0,7916 \times P_{eq750}^{0,8439} \quad (17)$$

$$Q_{95\_RHH1} = 0,2439 \times P_{eq750}^{0,9687} \quad (18)$$

$$Q_{95\_RHH2} = 0,2793 \times P_{eq750}^{0,9162} \quad (19)$$

$$Q_{95\_RHH3} = 0,2019 \times P_{eq750}^{0,9990} \quad (20)$$

$$Q_{95\_RHH4} = 0,7257 \times P_{eq750}^{0,8339} \quad (21)$$

$$Q_{7,10\_RHH1} = 0,1202 \times P_{eq750}^{1,0489} \quad (22)$$

$$Q_{7,10\_RHH2} = 0,1936 \times P_{eq750}^{0,9075} \quad (23)$$

$$Q_{7,10\_RHH3} = 0,1117 \times P_{eq750}^{1,0473} \quad (24)$$

$$Q_{7,10\_RHH4} = 0,6637 \times P_{eq750}^{0,7871} \quad (25)$$

Os resultados obtidos neste trabalho, assim como aqueles obtidos no estudo de regionalização de vazões realizado por GPRH e IGAM (2012) para a parte mineira da bacia do rio Paranaíba, mostram melhores ajustes estatísticos para o modelo potencial com a utilização da variável explicativa  $P_{eq750}$  para a maioria das situações analisadas.

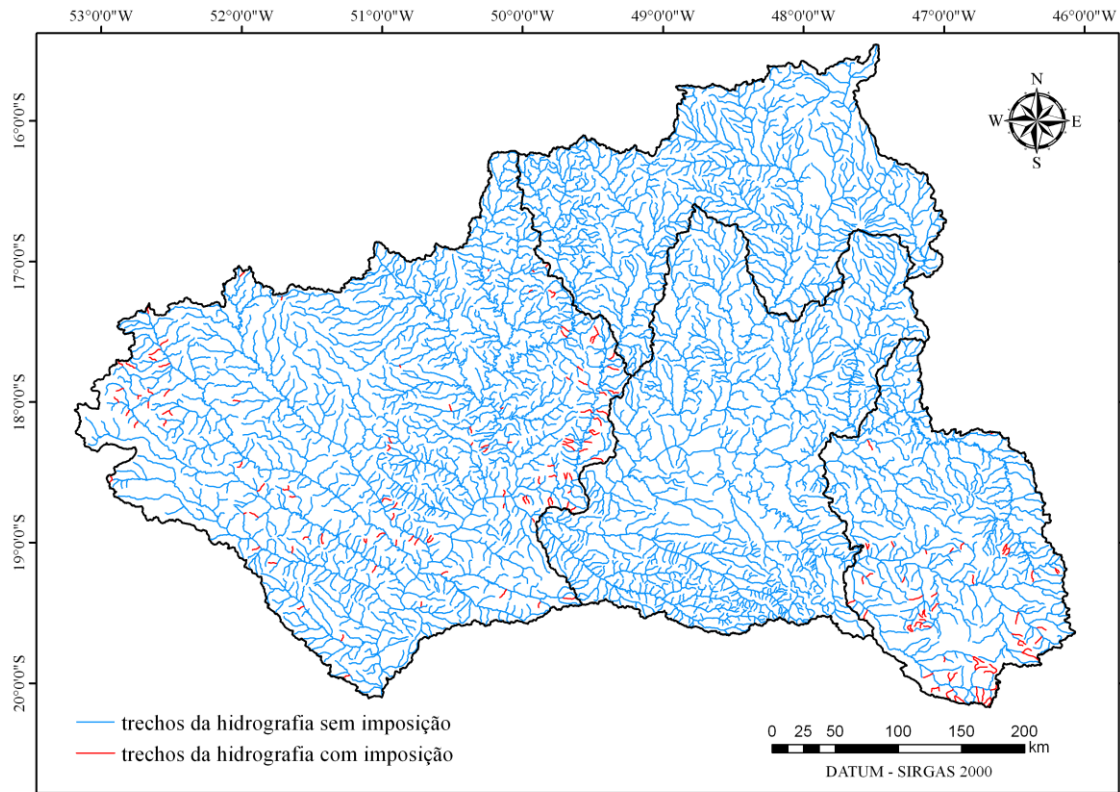
A partir das equações pode-se observar que a região 4 não apresentou bons resultados para os parâmetros

estatísticos do modelo potencial quando comparada com as outras regiões. Esse resultado pode ser evidenciado pelos menores valores  $R^2$ , maiores valores de  $s_e$  e também pelo expoente da equação de regionalização que para essa região foi mais distante da unidade, sendo o menor dentre as regiões.

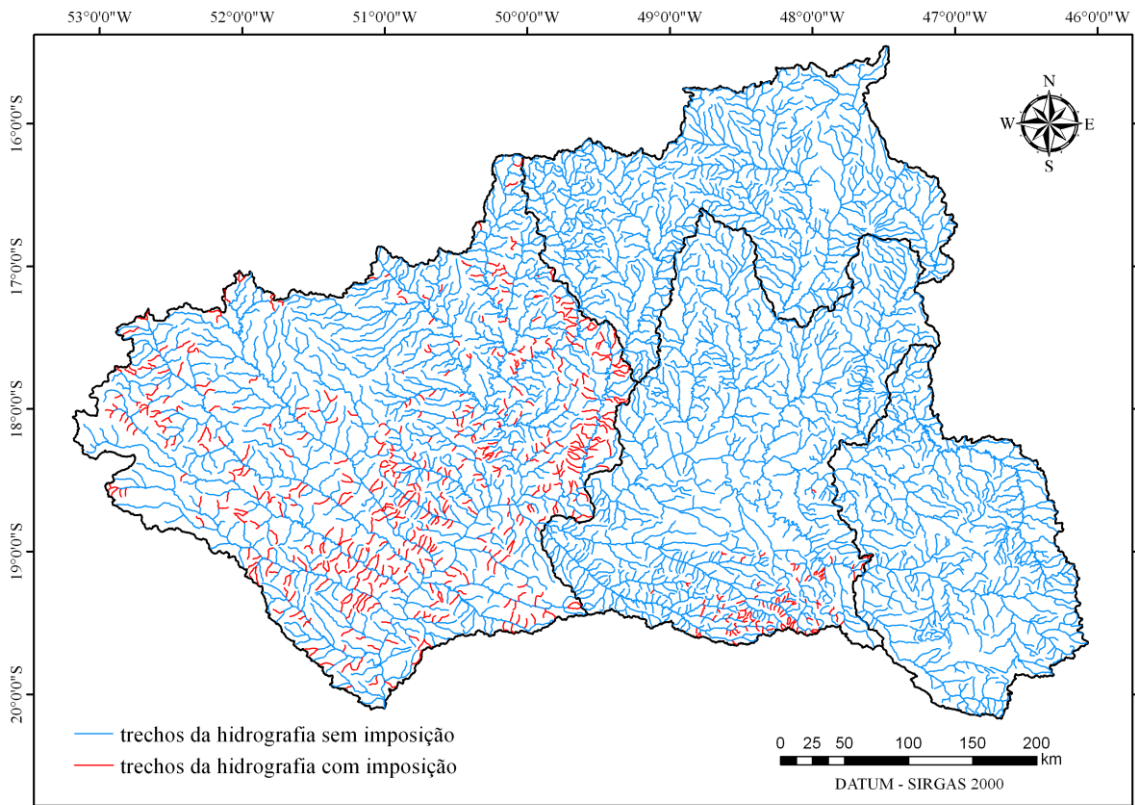
Expoentes menores que a unidade indicam uma tendência de superestimativa das vazões para pequenas áreas de drenagem, o que geralmente reflete em uma maior quantidade de trechos com necessidade de imposição.

Após a espacialização das equações selecionadas ao longo da hidrografia foi feita a análise do coeficiente de escoamento (CE), para a vazão média, e das vazões específicas ( $q_{min}$ ), para as vazões mínimas. Nas Figuras 5, 6, 7 e 8 são apresentados os mapas de imposição para as vazões em estudo, estando destacado em vermelho os trechos da hidrografia em que os índices físicos pré-estabelecidos superaram os valores máximos observados nas estações fluviométricas para cada região homogênea.

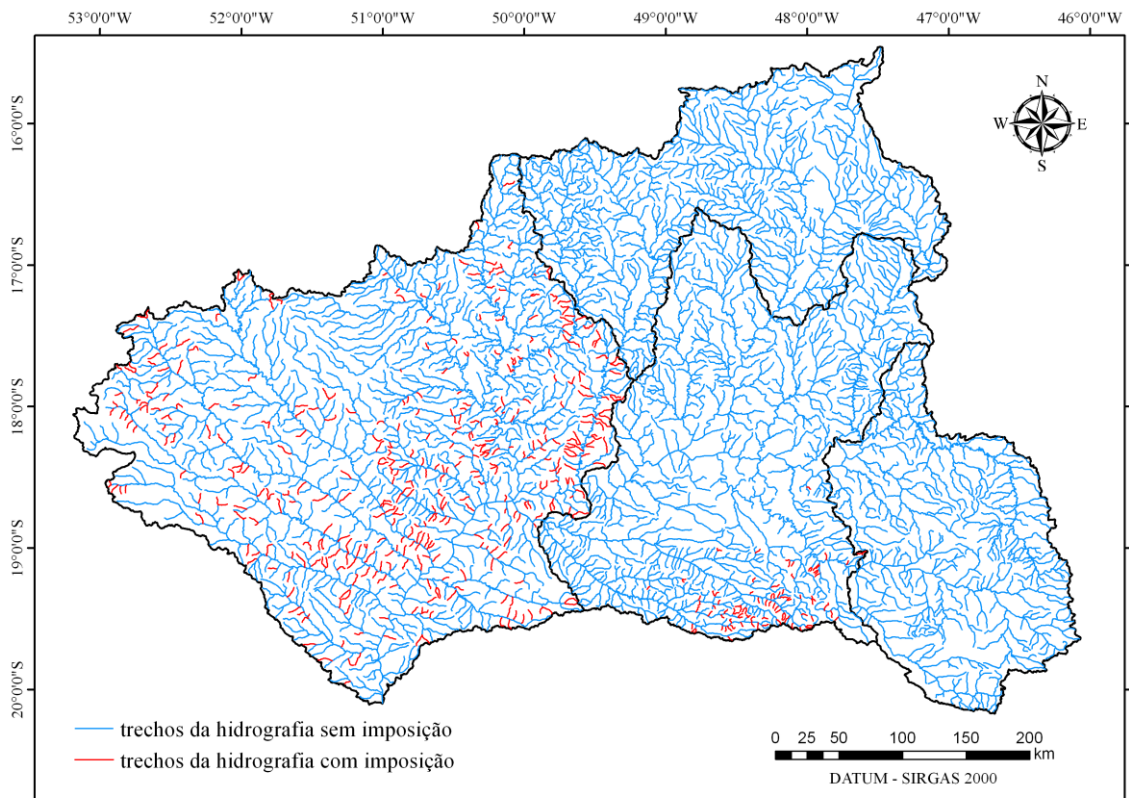
**Figura 5** – Mapa de imposição de restrição para regionalização da  $Q_{mld}$ .



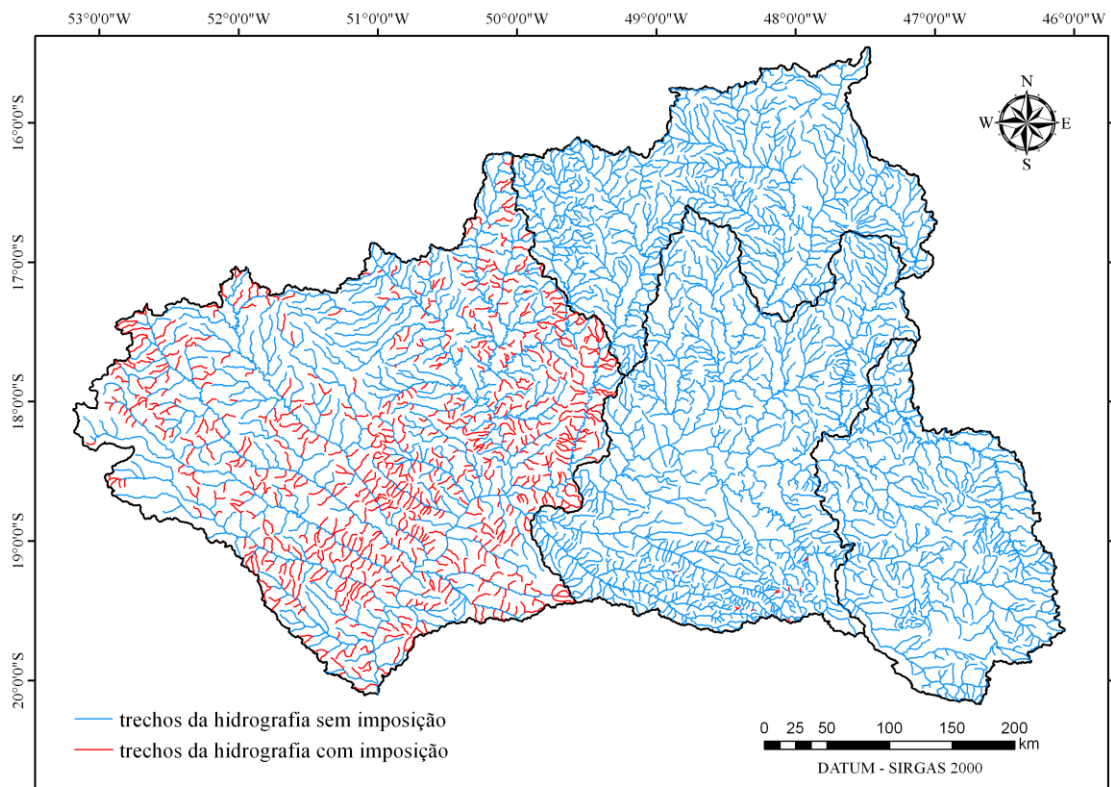
**Figura 6** – Mapa de imposição de restrição para regionalização da  $Q_{90}$ .



**Figura 7** – Mapa de imposição de restrição para regionalização da Q<sub>95</sub>.



**Figura 8** – Mapa de imposição de restrição para regionalização da Q<sub>7,10</sub>.



Nos trechos destacados em vermelho foi realizado o ajuste para imposição de limite à extrapolação da equação de regionalização, aplicando-se as equações apresentadas nas equações 26 a 41.

$$Q_{mld\_ajust\_RHH1} = 0,52312 \times Peq \quad (26)$$

$$Q_{mld\_ajust\_RHH2} = 0,38383 \times Peq \quad (27)$$

$$Q_{mld\_ajust\_RHH3} = 0,57147 \times Peq \quad (28)$$

$$Q_{mld\_ajust\_RHH4} = 0,54144 \times Peq \quad (29)$$

$$Q_{90\_ajust\_RHH1} = 0,010320 \times A \quad (30)$$

$$Q_{90\_ajust\_RHH2} = 0,008049 \times A \quad (31)$$

$$Q_{90\_ajust\_RHH3} = 0,009482 \times A \quad (32)$$

$$Q_{90\_ajust\_RHH4} = 0,015050 \times A \quad (33)$$

$$Q_{95\_ajust\_RHH1} = 0,009502 \times A \quad (34)$$

$$Q_{95\_ajust\_RHH2} = 0,007175 \times A \quad (35)$$

$$Q_{95\_ajust\_RHH3} = 0,008073 \times A \quad (36)$$

$$Q_{95\_ajust\_RHH4} = 0,01421 \times A \quad (37)$$

$$Q_{7,10\_ajust\_RHH1} = 0,007659 \times A \quad (38)$$

$$Q_{7,10\_ajust\_RHH2} = 0,005493 \times A \quad (39)$$

$$Q_{7,10\_ajust\_RHH3} = 0,005788 \times A \quad (40)$$

$$Q_{7,10\_ajust\_RHH4} = 0,01264 \times A \quad (41)$$

A região 4 apresentou maior quantidade de trechos onde foi necessária

a imposição de restrição, como pode ser observado nas Figuras 5 a 8. Nessa região, os trechos com imposição correspondem a 1,2%; 26,2%; 21,2%; e 27,3% do total para as vazões  $Q_{mld}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{7,10}$ , respectivamente. Esses resultados reforçam o desempenho inferior dessa RHH em comparação com as outras regiões.

## CONCLUSÕES

Os resultados permitiram concluir que:

- As equações do modelo potencial utilizadas, para a vazão média e para as vazões mínimas analisadas, apresentaram melhor desempenho em relação ao modelo linear.
- A variável explicativa: vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração do fator de abstração igual a 750 mm apresentou, para as regiões 1, 2 e 3, o melhor desempenho.
- A região 4 considerada no trabalho não apresentou bom desempenho na regionalização das vazões mínimas, sendo necessário estudos mais apurados sobre o seu comportamento.

## REFERÊNCIAS

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANAÍBA (CBH-PARANAÍBA). Agência Nacional de Águas (Org.).

**Caracterização geral da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.**  
Disponível em:



<<http://cbhparanaiba.org.br/>>. Acesso em: 25 de setembro de 2017.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro. v. 1, 1985.

FILGUEIRAS, Roberto et al. Produtos SRTM e RTC na caracterização morfológica e topográfica: uma abordagem comparativa. In: **Revista Nativa** p.10, 2018.

FILL, H. H. Informações hidrológicas. In **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel/ABRH, 1987.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS (GPRH), INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM), Vários colaboradores. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, IGAM: 2012.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis - an approach based on L-moments**. Cambridge University Press, P.224, 1997.

LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, 377, pp. 35- 42.

LIMA, G., PEIXOTO, L. S. MAUAD, F. F. A aplicação do modelo de simulação MIKE BASIN 2000 no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. In **Anais do 22nd Berian Latin-American**

**Congress on Computational Methods in Engineering**. Campinas, 2001. CD-Rom.

NUNES, A. de A., PRUSKI, F.F; R GO, F. R. “Alternativas para atenuar os riscos associados à extrapolação espacial na regionalização de vazões”. In **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1–8. 2013.

OLIVEIRA, A. N. G. **Aplicação de metodologias relacionadas à valoração da água para as bacias dos rios Grande e Paranaíba**. 2017. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada). Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande**. 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2008.

PRH-Paranaíba. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba**, 462. Agosto, 2011.

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, 2011. p.27-58.

PRUSKI, F. F. et al. 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. et al. 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. et al. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 5, p. 808-816, 2015.

PRUSKI, F. F. et al. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 36, n. 5, p. 830-838, 2016.

SOUSA, H. T. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. 2009. 86f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2009.