

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS REGIONALIZADAS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS DO SUL DE SANTA CATARINA, BRASIL

Cláudia Weber Corseuil¹; Álvaro José Back² & Marcos Ricardo Giehl³

Abstract: This study evaluated the regionalization of the minimum reference flows Q_{90} and Q_{95} in the Araranguá, Urussanga, and Tubarão river basins, Santa Catarina, Brazil. Daily and monthly flow and precipitation data from 1986 to 2021 were used, obtained from 15 streamflow and 18 rainfall stations. Minimum flows were estimated using flow duration curves and regionalized through the Regression Method with different models (linear, logarithmic, exponential, and power), based on physiographic and climatic variables. The drainage area was the most strongly correlated variable and proved to be the most effective predictor. The regression equations for Hydrologically Homogeneous Regions (HHR) 1 and 2 showed high performance ($R^2 > 0.92$; $ER\% < 30\%$; $\sigma F < 1.5$), and were suitable for estimating Q_{90} and Q_{95} flows. Conversely, HHR 3, corresponding to the Araranguá River basin, yielded less satisfactory results, especially for daily flows. The results emphasize the relevance of drainage area as a predictor and indicate limitations in flow estimates for basins with limited monitoring coverage.

Resumo: O presente trabalho avaliou a regionalização das vazões mínimas de referência Q_{90} e Q_{95} nas bacias dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão, Santa Catarina, Brasil. Foram utilizados dados diários e mensais de vazão e precipitação do período de 1986 a 2021, obtidos de 15 estações fluviométricas e 18 pluviométricas. As vazões foram estimadas pela curva de permanência e regionalizadas pelo Método de Regressão com diferentes modelos (linear, logarítmico, exponencial e potencial), considerando variáveis fisiográficas e climáticas. A área de drenagem apresentou a maior correlação com as vazões mínimas e foi a variável preditora mais eficiente. As equações ajustadas para as Regiões Hidrológicamente Homogêneas (RHH) 1 e 2 mostraram elevado desempenho ($R^2 > 0,92$; $ER\% < 30\%$; $\sigma F < 1,5$), sendo adequadas para estimativa das vazões Q_{90} e Q_{95} . Por outro lado, a RHH 3, correspondente à bacia do rio Araranguá, apresentou resultados menos satisfatórios, especialmente para as vazões diárias. Os resultados evidenciaram a importância da área de drenagem como preditor das vazões regionalizadas e apontam limitações nas estimativas em bacias com menor cobertura de monitoramento hidrológico.

Palavras-Chave – Vazão de referência; região homogênea; disponibilidade hídrica.

1) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Rodovia Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, SC, CEP: 88.906-072, Fones: (48) 3721-6255/(48)996128438; e-mail: claudia.weber@ufsc.br

2) Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Rodovia SC 108, km 353, n°1563, Bairro da Estação, Urussanga, SC, CEP 88840-000, fone: (48) 3403-1382; e-mail: ajb@epagri.sc.gov.br

3) Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Rodovia Gov. Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá, SC, CEP: 88.906.-072, fone (48) 99986-9838, e-mail: mrgiehl@gmail.com

INTRODUÇÃO

Segundo a ONU, a população mundial passou de 2,5 bilhões para 7,8 bilhões entre 1950 e 2022, podendo alcançar 9,7 bilhões até 2050 (UN, 2022). A urbanização também é uma tendência global: estima-se que, até 2030, 60% da população estará em áreas urbanas, e uma em cada três pessoas viverá em cidades com pelo menos meio milhão de habitantes (UN, 2018). No Brasil, o Censo de 2022 aponta que 61,1% da população já vive em áreas urbanas (IBGE, 2023). Esse crescimento intensifica a demanda por água, alimentos e energia, pressionando os recursos hídricos (Corseuil et al., 2024).

A conservação dos recursos hídricos é essencial para os ecossistemas e para atividades como agricultura, pecuária e indústria. Gerenciar as demandas hídricas, porém, exige garantir um volume adequado para cada uso, o que requer, inicialmente, a avaliação da disponibilidade hídrica da bacia.

Visando proporcionar meios para que a água seja utilizada de forma sustentável e equilibrada, a gestão dos recursos hídricos no Brasil tem como base a Lei Federal 9.433/1997, que considera a água como um bem de domínio público, limitado e com valor econômico (Brasil, 1997). A outorga de uso é um de seus principais instrumentos, permitindo o controle dos usos e o acesso equitativo à água (ANA, 2019). A concessão da outorga exige análises técnicas, geralmente baseadas na disponibilidade hídrica da bacia (ANA, 2019). Essa disponibilidade pode ser estimada por vazões médias e mínimas, com base em distribuições de frequência ou pela curva de permanência (Back et al., 2019). As vazões médias representam o potencial hídrico da bacia (Pruski et al., 2012), enquanto as mínimas refletem condições críticas de estiagem (Schreffler, 1998). As vazões mínimas representam o limite máximo de uso normalmente, baseado em vazões de estiagem ou com alta probabilidade de superação (Galatto e Back, 2023) e são usadas para garantir a quantidade e a qualidade da água, inclusive na geração de energia, irrigação e abastecimento urbano (Galatto e Back, 2023; Oliveira, 2013).

A Q₉₀ e Q₉₅ são comumente utilizadas como referência em outorgas e obtidas por meio da Curva de Permanência (Back et al., 2019), que relaciona vazão e frequência (Tucci, 2017). Essa curva permite avaliar o regime hidrológico da bacia, entretanto curvas calculadas com dados diários são mais realistas do que com dados mensais ou anuais, que tendem a superestimar as vazões (Collischonn e Dornelles, 2021).

A estimativa dessas vazões depende de séries históricas de dados fluviométricos. No entanto, a escassez de estações com séries longas e confiáveis dificulta os estudos hidrológicos (Collischonn et al., 2023). Para superar essa limitação, utiliza-se a regionalização de vazões, com destaque para o Método de Regressão, que relaciona as vazões com as características físicas e climáticas de bacias homogêneas (ELETROBRAS, 1985; Tucci, 2002; Pruski et al., 2012), sendo amplamente adotado para Q₉₀ e Q₉₅ (Bazzo et al., 2017; Cecílio et al., 2018; Aguiar, 2020).

Nas bacias dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão, no sul de Santa Catarina, diversas atividades econômicas fazem uso intensivo de água. Este estudo teve por objetivo avaliar as vazões mínimas de referência Q₉₀ e Q₉₅ regionalizadas pelo Método de Regressão para essas bacias hidrográficas.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende as bacias dos rios Tubarão (4735,00 km²), Urussanga (679,16 km²) e Araranguá (3030,0 km²), sul de Santa Catarina. O clima nessas bacias nas partes mais altas (acima de 900 m) é o Cfb-temperado mesotérmico úmido e, nas partes mais baixas o Cfa-subtropical

mesotérmico úmido, conforme a classificação de Koppen (Alvares et al., 2013). A umidade relativa do ar é 81,5% e a chuva média anual varia 1378,0 a 2072,0 mm.

No presente trabalho foram utilizados dados simultâneos de vazão e precipitação do período de 1986 a 2021, critério utilizado por Euclides et al. (2001). Os dados foram obtidos das estações da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024) localizadas na área de estudo. Foram consideradas séries históricas com no máximo 10% de falhas, conforme recomendam Cupak (2017) e Molina et al. (2014). Foram selecionadas 18 estações pluviométricas e 15 fluviométricas (Tabelas 1, 2 e Figura 1). Para a identificação das falhas utilizou-se o software SisCAH 1.0 (SOUZA, 2009).

Figura 1 – Localização das bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão, Santa Catarina.

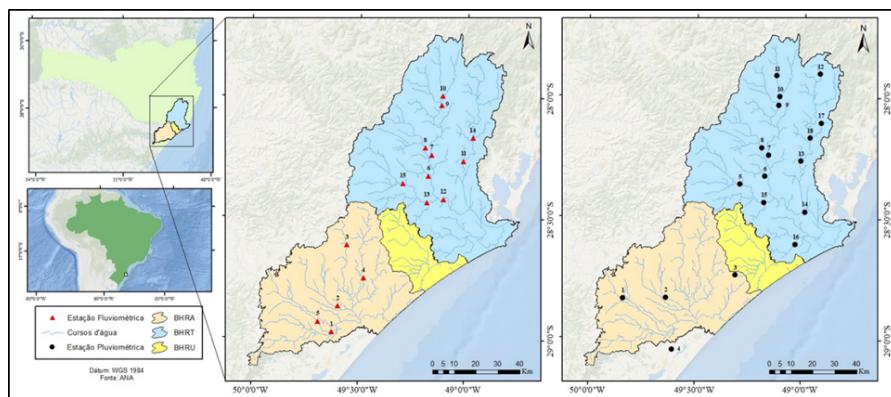


Tabela 1- Estações pluviométricas e precipitação média anual do período de 1986 a 2021.

Nome da estação	Código	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Pma (mm)
BHRA					
Timbé do Sul	2849019	115	-28.8350	-49.8378	2072,05
Meleiro	2849005	80	-28.8322	-49.6367	1770,11
Içara	2849022	50	-28.7356	-49.3139	1610,63
Sombrio	2949003	18	-29.0458	-49.6067	1459,82
BHRT					
Orleans - Montante	2849001	90	-28.3589	-49.2950	1552,10
São Ludgero I	2849002	40	-28.3258	-49.1792	1606,00
Braço do Norte	2849030	68	-28.2389	-49.1628	1469,87
Rio Pequeno	2849008	93	-28.2094	-49.195	1648,16
Santa Rosa de Lima	2849031	248	-28.0322	-49.1186	1754,36
Divisa de Anitápolis	2749012	320	-27.9956	-49.1156	1886,64
Anitápolis	2749027	419	-27.9097	-49.1297	1873,84
São Bonifácio	2748018	425	-27.9008	-48.9278	1709,20
Armazém Capivari	2848000	21	-28.2617	-49.0122	1378,26
Tubarão	2849027	14	-28.4722	-48.9911	1483,88
Pedras Grandes	2849028	40	-28.4344	-49.1825	1504,15
Jaguaruna	2849020	10	-28.6067	-49.0331	1454,76
Vargem do Cedro	2848006	166	-28.1036	-48.9194	1705,93
São Martinho Jusante	2848009	41	-28.1656	-48.9711	1463,09

Tabela 2. Estações fluviométricas utilizadas com dados diários do período de 1986 a 2021.

Nome da estação	Código	A (km ²)	Latitude (°)	Longitude (°)
BHRA				
Ermo	84949800	863,00	-28.9725	-49.6372
Foz do Manuel Alves	84853000	355,00	-28.8536	-49.5897
Serrinha - jus 200m - CASAN	84800000	119,00	-28.6125	-49.5514
Turvo	84949000	336,00	-28.9422	-49.7022
Forquilhinha	84820000	526,00	-28.7492	-49.4744
BHRT				
São Ludgero I	84560000	1690,00	-28.3258	-49.1792
Braço do norte - montante	84559800	1515,00	-28.2389	-49.1631
Rio Pequeno	84551000	379,00	-28.2094	-49.195
Santa Rosa de Lima	84520010	676,00	-28.0331	-49.1186
Divisa de Anitápolis	84520000	380,00	-27.9956	-49.1161
Armazém Capivari	84600000	770,00	-28.2606	-49.0147
Rio do pouso	84580000	2740,00	-28.4206	-49.1064
Pedras grandes	84300000	822,00	-28.4347	-49.1831
São Martinho - jusante	84598002	620,00	-28.1656	-48.9717
Orleans - montante	84249998	599,00	-28.3586	-49.295

Foram determinadas as vazões mínimas de referência Q₉₀ e Q₉₅, diárias e mensais, pelo método da Curva de Permanência com o software SisCAH 1.0. A metodologia foi baseada em Tucci (2017), entretanto utilizou-se todos os valores de vazões, em vez de agrupá-las em intervalos de classes.

Para a regionalização das vazões Q₉₀ e Q₉₅ foi utilizado o Método de Regressão, aplicando as regressões Linear, Logarítmica, Potencial e Exponencial, fundamentado na identificação de relação estatística entre a vazão e as características físicas e climáticas da bacia. De acordo com Naghettini e Pinto (2007) e Tucci (2017), as variáveis que têm melhor correlação com as vazões médias mínimas são: a área de drenagem (A), a declividade média do rio principal (DmR), densidade de drenagem (Dd) e a precipitação média anual (Pma), sendo portanto utilizadas no presente trabalho na definição das regiões hidrologicamente homogêneas e na regionalização das vazões Q₉₀ e Q₉₅.

As equações de regressão multivariadas foram obtidas pelo software Stata 14.2 (StataCorp, 2016), utilizando as variáveis independentes, que apresentaram as maiores correlações. As equações avaliadas foram a Linear, Exponencial, Potencial e Logarítmica, dadas, respectivamente, por:

$$Q = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

$$Q = \beta_0 \cdot e^{\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n} \quad (2)$$

$$Q = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_n^{\beta_n} \quad (3)$$

$$\ln Q = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \dots + \beta_n \ln X_n \quad (4)$$

Em que, Q é a vazão regionalizada (Q₉₀ e Q₉₅); X₁, X₂, ..., X_n, são as variáveis independentes (A, DmR, Dd e Pma); β₀, β₁, β₂, ..., β_n são os coeficientes de regressão das variáveis independentes.

Foram utilizadas as áreas de drenagem da ANA (202) para cada estação fluviométrica (Tabela 2). A DmR foi calculada pela diferença entre as altitudes dos pontos mais alto e mais baixo do rio principal de cada sub-bacia (estação), dividida pelo seu comprimento total. A Dd foi obtida pela razão entre o comprimento total dos rios (m) e a área de drenagem. Foi utilizado o método de Isoietas para

calcular a Pma da área de estudo, considerando o limite das bacias dos rios Araranguá (BHRA), Tubarão (BHRT) e Urussanga (BHRU) (Figura 1).

Para a obtenção das variáveis físicas e climática, bem como para a elaboração do mapa de isoetas utilizou-se um Modelo Digital de Elevação (30 x 30 m) (INPE, 2024) e o software ArcGIS 10.8 (ESRI, 2019). O mapa de Isoetas foi elaborado com base nos dados de Pma (Tabela 1), utilizando o método de interpolação IDW e a potência 2 para o cálculo da distância.

A homogeneidade das regiões foi verificada por meio do coeficiente Pearson (r), obtido a partir da análise de correlação entre as vazões Q_{90} e Q_{95} diárias e mensais e as variáveis físicas e climática. Com base nos coeficientes r foram identificadas as variáveis mais adequadas para a regionalização, bem como aquelas que apresentaram maior correlação com as vazões de referência.

A definição das RHHs foi feita usando o coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R^2a) $\geq 0,90$, erro padrão fatorial (σF) $\leq 1,5$ e erro relativo (ER%) $\leq 30\%$, como recomendam ELETROBRÁS (1985); Tucci (2017); Bazzo et al. (2017).

As vazões estimadas por equações de regionalização podem subestimar ou superestimar as vazões, independente da adequação dos resultados da análise de regressão (Maciel et al., 2019), sendo portanto, necessário avaliar os dados estimados em relação aos observados, usando índices de desempenho como, o Erro Relativo (ER%), Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e Logaritmo do Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe (log NSE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

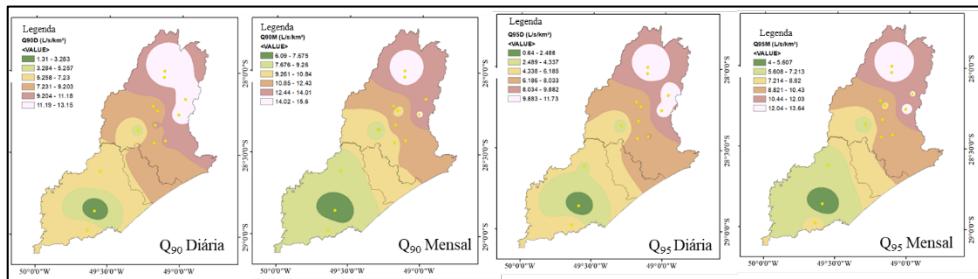
Observou-se entre as vazões observadas diárias e mensais que, na BHRA os maiores ER% foram verificados na estação 84949000 (336,00 km²), sendo de 88,58% e 87,73% para as vazões Q_{90} e Q_{95} , respectivamente. Na BHRT os maiores ER% foram observados na estação 84551000 (379,00 km²), sendo de 28,48% e 31,81% para as vazões Q_{90} e Q_{95} , respectivamente. Por outro lado, os menores ER% verificados na BHRA foram na estação 84800000 (119,00 km²) a jusante da barragem de São Bento (Siderópolis-SC), sendo de 18,95% (Q_{90}) e 29,17% (Q_{95}). Na BHRT a estação que apresentou os menores ER% foi a 84600000 (770,00 km²), sendo de 10,22% (Q_{90}) e 13,64% (Q_{95}). Observou-se que, à medida que a vazão de permanência diminui, aumenta o ER%, corroborando com Novaes et al. (2007) e Bazzo et al. (2017), e que as vazões calculadas com dados mensais são superestimadas em relação às diárias para todos os casos.

No Brasil, o critério de outorga de uso da água comumente adotado pelos órgãos gestores é baseado nas vazões mínimas relacionadas às permanências de 90% e 95% do tempo (Q_{90} e Q_{95}). Se os usos exigem maior garantia, deve-se optar por vazões mais conservadoras, como a $Q_{7,10}$ ou um percentual das vazões Q_{90} e Q_{95} , como utilizado em vários estados brasileiros (Macedo et al., 2024). Nos casos de dimensionamento de usinas hidrelétricas de pequeno porte, segundo Tucci (2017), é recomendado utilizar dados diários, para assegurar que tenha vazão suficiente para gerar energia na maior parte dos dias. Back et al. (2019) constataram que, a utilização de dados mensais para a determinação da curva de permanência, superestima os valores de vazão para frequências superiores a 20%. Assim, nos projetos de construção de hidrelétricas a fio d'água ou nos casos de captação de água sem reservatórios, recomendam utilizar a curva de permanência com valores de vazão diária.

Foi utilizada a matriz de Correlação de Pearson (r) para a definição das RHHs, relacionando-se as vazões de referência com as características físicas e climáticas das bacias de estudo, considerando a localização geográfica das estações fluviométricas. Os melhores coeficientes de correlação (r) foram obtidos ao dividir a área de estudo em 3 RHHs, sendo que, 2 englobando a BHRT e BHRU (r

> 0,912), e uma RHH contendo somente a BHRA ($r > 0,871$). Ressalta-se que as melhores correlações, tanto com a vazões diárias, como mensais foram obtidas com a área de drenagem (A). A Figura 2 mostra as vazões de referência específicas (litros.s⁻¹.km²) para todas as 3 RHHs.

Figura 2 - Vazões de referência específicas (litros.s⁻¹.km²)



Na Tabela 3 constam as equações de regionalização obtidas para as vazões Q_{90} e Q_{95} , diárias e mensais, para as regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) 1, 2 e 3. A análise de regressão múltipla evidenciou que, o melhor ajuste das equações foi obtido considerando apenas a área de drenagem como variável independente (Tabela 4), superando os modelos que incluíram as demais variáveis testadas (Dd, DmR e Pma) em ambas as RHHs.

Tabela 3 - Equações regionalizadas para vazões Q_{90} e Q_{95} diárias nas RHH 1, 2 e 3.

RHH	Vazão	Equação	R^2	R^2a	σF
DIÁRIA					
1	Q_{90}	$Q = 5,3396 \cdot \ln A - 26,593$	0,961	0,948	1,1
	Q_{95}	$Q = 3,946 \cdot \ln A - 18,696$	0,944	0,926	1,1
2	Q_{90}	$Q = 0,004 \cdot A^{1,1101}$	0,997	0,996	1,4
	Q_{95}	$Q = 0,0025 \cdot A^{1,1505}$	0,998	0,997	1,5
3	Q_{90}	$Q = 0,2306 \cdot e^{0,003A}$	0,798	0,730	1,4
	Q_{95}	$Q = 0,1199 \cdot e^{0,0034A}$	0,786	0,710	1,5
MENSAL					
1	Q_{90}	$Q = 6,5328 \cdot \ln A - 32,916$	0,987	0,983	1,1
	Q_{95}	$Q = 5,4438 \cdot \ln A - 27,028$	0,978	0,971	1,1
2	Q_{90}	$Q = 0,0074 \cdot A^{1,0563}$	0,997	0,995	1,4
	Q_{95}	$Q = 0,0055 \cdot A^{1,077}$	0,998	0,997	1,4
3	Q_{90}	$Q = 0,008 \cdot A - 0,516$	0,962	0,950	1,5
	Q_{95}	$Q = 0,0042 \cdot A^{1,008}$	0,899	0,870	1,3

RHH- Regiões hidrologicamente homogêneas.

As equações das RHH 1 e 2 apresentaram coeficientes de determinação (R^2) e de determinação ajustado (R^2a) superiores a 0,926, indicando elevada capacidade preditiva dos modelos baseados apenas na área de drenagem. Este resultado corrobora com outros estudos em diferentes contextos hidrográficos, como os de Zagonel (2021), Maciel (2019), Bazzo et al. (2017) e Rocha et al. (2024), que demonstraram forte correlação entre a área de drenagem e as vazões Q_{90} e Q_{95} . Portanto, mesmo em regiões com características distintas, a área de drenagem se mantém como um preditor robusto, sobretudo quando não há dados hidrológicos disponíveis no local. Na RHH 3 as equações apresentaram um R^2 e R^2a variando de 0,87 a 0,962 para as vazões mensais. No entanto, para as vazões diárias esses coeficientes foram inferiores, variando de 0,71 a 0,789. Elesbon et al. (2015) e Silva et al. (2009) comentam que, mesmo quando os valores de R^2 e R^2a forem superiores a 0,70, as RHHs podem ser considerada adequada para regionalização.

A dispersão dos valores observados da variável independente em torno da função ajustada, pode ser avaliada pelo σF , que quanto menor o seu valor, melhor é o ajuste da equação de regressão, mostrando a confiabilidade da média amostral. Maciel et al., (2019), Bazzo et al. (2017) e Eletrobrás (1985) comentam que, equações de regionalização estatisticamente satisfatórias apresentam em R^2 e R^2a superiores a 0,75 e $\sigma F < 1,5$. Portanto, os resultados obtidos neste estudo podem ser considerados adequados para a estimativa das vazões Q_{90} e Q_{95} em locais sem dados fluviométricos na região.

Tabela 4 - Comparaçāo entre vazões diárias observadas e estimadas pelas equações de regionalização.

RH	Código	Q ₉₀ (m ³ s ⁻¹)			Q ₉₅ (m ³ s ⁻¹)		
		Q _{obs}	Q _{est}	ER%	Q _{obs}	Q _{est}	ER%
DIÁRIA							
1	84559800	12,25	12,51	-2,12	9,86	10,20	-3,46
	84520010	7,81	8,20	-5,00	6,86	7,02	-2,29
	84520000	5,00	5,13	-2,50	4,46	4,74	-6,37
	84600000	9,84	8,90	9,59	8,36	7,53	9,92
	84598002	7,57	7,74	-2,23	6,63	6,68	-0,69
2	84249998	4,15	4,85	-16,74	3,41	3,92	-14,98
	84560000	15,96	15,32	3,99	13,39	12,93	3,43
	84551000	3,29	2,92	11,40	2,53	2,32	8,47
	84580000	26,37	26,20	0,64	22,30	22,55	-1,10
	84300000	6,49	6,88	-6,08	5,38	5,64	-4,89
3	84853000	0,47	0,67	-42,33	0,23	0,40	-74,29
	84800000	0,77	0,33	57,20	0,51	0,18	64,77
	84949800	3,44	3,07	10,73	2,51	2,25	10,16
	84820000	2,31	1,12	51,60	1,68	0,72	57,40
	84949000	0,17	0,63	-269,51	0,08	0,38	-358,29
MENSAL							
1	84559800	14,82	14,93	-0,71%	12,61	12,84	-1,81%
	84520010	9,82	9,65	1,70%	8,75	8,45	3,49%
	84520000	5,93	5,89	0,68%	5,18	5,31	-2,49%
	84600000	10,96	10,50	4,16%	9,68	9,15	5,44%
	84598002	8,53	9,09	-6,54%	7,50	7,97	-6,32%
2	84249998	5,39	6,35	-17,88%	4,61	5,39	-16,94%
	84560000	19,93	19,00	4,65%	17,08	16,47	3,55%
	84551000	4,60	3,92	14,83%	3,71	3,29	11,25%
	84580000	32,73	31,66	3,27%	27,99	27,72	0,96%
	84300000	8,32	8,88	-6,68%	7,28	7,58	-4,12%
3	84853000	2,16	2,32	-7,59%	1,42	1,56	-10,05%
	84800000	0,95	0,44	54,11%	0,72	0,52	27,88%
	84949800	6,53	6,39	2,17%	4,75	3,83	19,45%
	84820000	3,78	3,69	2,35%	3,15	2,32	26,34%
	84949000	1,50	2,17	-45,09%	0,67	1,48	-121,31%

Código - Estações da ANA. ER% > 0 - vazão subestimada; ER% < 0 - vazão superestimada

Na Tabela 4 observa-se que nas RHH 1 e RHH 2 os erros relativos (ER%) entre as vazões diárias e mensais, regionalizadas e as observadas nas estações foram < 30%, indicando que as Equações de Regressão (Tabela 3) são adequadas para estimar as vazões Q₉₀ e Q₉₅, tanto diárias, como mensais, nas bacias hidrográficas dos rios Tubarão (BHRT) e Urussanga (BHRU).

Entretanto, na RHH 3, que abrange apenas a bacia do rio Araranguá, os valores de ER% foram superiores a 30% para as vazões diárias, exceto para a estação 84949800 (ER% < 10,73%) para ambas as vazões. Por outro lado, nas vazões mensais, os valores de ER% permaneceram abaixo de 30% para a maioria dos percentis analisados, com exceção para a estação 84800000 (Serrinha –Jusante) na vazão Q₉₀ e para a estação 84949000 (Turvo) em ambas vazões.

Aguiar (2020), em estudo de regionalização para as BHRT, BHRA e BHRU, observou valores de ER% com desempenho inferior aos obtidos no presente estudo. Essa diferença pode ser atribuída à metodologia aplicada no presente trabalho, que considerou apenas períodos com dados simultâneos de vazão e precipitação, resultando em uma série histórica de 1986 a 2021. Este procedimento, pode ter contribuído para um melhor ajuste das equações com base na amostra selecionada.

No presente estudo, os maiores ER% foram identificados nas estações com menores áreas de drenagem (Tabelas 2). Pruski et al. (2015), comentam que as equações de regionalização que utilizam somente a área de drenagem para estimativa de vazões, podem não refletir o efeito da variabilidade espacial das precipitações na bacia, comprometendo a precisão na estimativa das vazões nas menores áreas de drenagem. Essa diferença é mais relevante no estudo de vazões mínimas, como Q₉₀ e Q₉₅.

A Tabela 5 apresenta os indicadores de desempenho estatístico das equações de regressão ajustadas para as três RHHs. Os indicadores apresentados quantificam a diferença em magnitude entre as vazões observadas nas estações fluviométricas e as estimadas por meio da regionalização, permitindo avaliar a precisão e a robustez dos modelos ajustados.

Tabela 5 – Parâmetros de desempenho das equações de regressão para a regionalização.

RHH	VAZÃO	MAE ($m^3.s^{-1}$)	RMSE ($m^3.s^{-1}$)	LogNash
DÁRIA				
1	Q ₉₀	0,378	0,481	0,969
	Q ₉₅	0,331	0,427	0,954
2	Q ₉₀	0,454	0,493	0,986
	Q ₉₅	0,339	0,360	0,991
3	Q ₉₀	0,530	0,630	0,470
	Q ₉₅	0,400	0,490	0,440
MENSAL				
1	Q ₉₀	0,265	0,335	0,986
	Q ₉₅	0,333	0,364	0,979
2	Q ₉₀	0,839	0,861	0,979
	Q ₉₅	0,475	0,512	0,986
3	Q ₉₀	0,320	0,390	0,670
	Q ₉₅	0,580	0,670	0,710

De modo geral, os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que, as equações de regressão ajustadas para as RHHs (Tabela 3) tiveram bom desempenho, conforme indicado pelos valores do MAE e do RMSE. A semelhança entre os valores de MAE e RMSE evidencia baixa dispersão dos erros e reforça a qualidade do ajuste das equações às regiões homogêneas. Estudos que obtiveram resultados de EMA e RMSE acima de $2 m^3.s^{-1}$, consideraram aceitáveis as equações de regionalização para estimar as vazões Q₉₀ e Q₉₅ (Araújo et al. 2018; Matos et al., 2020)

Observa-se na Tabela 5 que o LogNash variou de 0,954 a 0,986 nas RHH 1 e 2, indicando um bom desempenho dos modelos de regressão, dado que valores próximos de 1 indicam forte concordância entre vazões estimadas e observadas (Moriasi, 2007). Segundo Pushpalatha et al. (2012) valores de $logNSE > 0,7$ são considerados satisfatórios na estimativa das vazões médias mínimas. No entanto, na RHH 3 o LogNash foi inferior a 0,71 em todas as vazões mínimas de referência (diárias e mensais), mostrando que nessa região o modelo de predição de vazão é insatisfatório.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a adequação das equações de regionalização propostas para estimativa das vazões de referência Q₉₀ e Q₉₅ (diária e mensal) para as bacias BHRT e BHRU, especialmente quando consideradas as duas RHHs definidas a partir da análise de correlação. Entretanto, na BHRA as equações não tiveram desempenho satisfatório, o que pode estar relacionado à escassez de estações fluviométricas, não representando a heterogeneidade da região de análise. A área de drenagem foi a variável preditora com maior poder explicativo, corroborando a literatura e conferindo aplicabilidade às equações ajustadas. A análise estatística revelou que as equações tiveram desempenho satisfatório para as RHH 1 e 2, com valores de Erro Relativo inferiores a 30% e tendência de maiores erros em bacias com menor área de drenagem. Entretanto, na maioria das estações da RHH 3 o ER% > 30%, corroborando com a análise anterior. Apesar dos valores de MAE e RMSE de todas as RHHs indicarem baixa dispersão e ausência de erros significativos entre as vazões observadas e estimadas, o LogNash mostrou melhor desempenho para a estimativa da Q₉₀ e Q₉₅ nas RHH 1 e 2. Neste estudo observou-se que o número reduzido de estações fluviométricas na região da BHRA e BHRU, influenciou na estimativa dessas vazões pela metodologia utilizada. Recomenda-se aumentar o número de estações fluviométricas na BHRA e BHRU, afim de considerar a heterogeneidade das características físicas e climática dessas bacias.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (2019). “Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos” – Brasília, DF.
- AGUIAR, A.F.O. (2020). “Regionalização de vazões mínimas diárias e mensais para bacias hidrográficas do sul de Santa Catarina, Brasil”. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade). UFSC. 113p.
- ALVARES, C.A. et al. (2013). “Koppen’s climate classification map for Brazil”. Meteorologische Zeitschrift. 22 (6) p. 711–728.
- ARAUJO, F.C. et al. (2018). “Streamflow regionalization in Piquiri river basin”. Eng. Agrícola, v. 38, n.1, p. 22-31.
- BACK, Á. J.; ZAMBRANO, G. J. D.; CORSEUIL, C. W. (2019). “Streamflow permanence curve of the river Timbó, Santa Catarina, Brazil”. Acta Brasiliensis, v.3, n.2, p.56-61.
- BAZZO, K. R et al. (2017). “Regionalização da vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS”. Revista Ambiente e Água, Taubaté, v.12, n.5, p. 855-870.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2021). “Hidrologia para engenharias e ciências ambientais”. 3^a Imp. Porto Alegre, RS: ABRHidro: 347p.
- COLLISCHONN, W. et al. (2023). “Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza”. Brasília; Porto Alegre, RS. ABRHidro, 101 p.
- CUPAK, A.; (2017). “Initial results of nonhierarchical cluster methods use for low flow grouping”. Journal of Ecological Engineering, Poland, v.18, n. 2, p. 44–50.
- ELETROBRÁS - Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. (1995). “Metodologia para regionalização de vazões”. Rio de Janeiro, RJ. 202 p.

- EUCLYDES, H. et al. (2001). “*Regionalização Hidrológica na Bacia do Alto São Francisco à Montante da Barragem de Três Marias, MG*”. RBRH [S.L.], v. 6, n. 2, p. 81-105.
- GALATTO, S.L.; BACK, A.J. (2023). “*Distribuição de probabilidades para determinação de vazão mínima de referência anual e sazonal da bacia do Rio Araranguá, Santa Catarina, Brasil*”. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v.16, n.9, p.
- INPE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. (2024). “*Banco de dados Geomorfométricos do Brasil-TOPODATA*”. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em . 2024.
- IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2023). “*Censo Demográfico 2022- População e domicílios - Primeiros resultados*”. RJ.. IBGE.
- MACIEL, A.L. et al. (2019). “*Regionalização e espacialização de vazões de permanência: Estudo aplicado na bacia do Rio Piracicaba-MG*”. Revista Brasileira de Climatologia. v. 24, (1), 114-133.
- MACEDO, A.S.A.D.; STINGHEN, C.M.; MANNICH, M. (2024). “*Vazões de referência sazonal e sua aplicação na outorga de recursos hídricos*”. Rev. Gestão de Água da América Latina, e21.v.21.
- MATOS, T.S. et al. (2020). “*Regionalization of maximum, minimum and mean streamflows for the Juruena River basin, Brazil*”. Amb. e Agua - an Interdisciplinary Journal of Applied Science,v. 15, n. 3, p. 1-18.
- MELATI, M.D.; MARCUZZO, F.F.N. (2016). “*Régressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas*”. Ciência e Natura, UFSM. Santa Maria, RS. v.38, n.2, p. 722-739.
- MOLINA, S.K.M. et al. (2014). “*Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões*”. Geociências, São Paulo, UNESP, v. 33, n. 3, p. 506-515.
- MOREIRA, J.; GUILHON, L.; ROCHA, V. (2001). “*Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos*”. RBRH, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 13-20.
- MORIASI, D.N. et al. (2007). “*Model evaluation guidelines for systematic quantification od accuracy in watershed simulations*”. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, p. 900.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É.J. (2007). “*Hidrologia estatística*”. CPRM, BH, MG. 2007. 552p.
- NOVAES, L.F. et al. (2007). “*Avaliação do desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões*”. RBRH, Porto Alegre, RS, v. 12, n. 2, p. 51-61.
- OLIVEIRA, V.A. (2013). “*Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 e GD2*”. Dissertação (Mestrado) -UFLA. 99p.
- PRUSKI, F.F. et al. (2012). “*Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: alternativas para atenuar os riscos*”. Water Resources and Irrigation Management, Cruz das Almas, v. 1, n. 1, p. 51-59.
- PRUSKI, F.F. et al. (2015). “*Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept*”. Engenharia Agrícola, 35(5), 808-816.
- PUSHPALATHA, R. et al. (2012) “*A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations*”. Journal of Hydrology, v. 420-421, p. 171-182.
- TUCCI, C.E. M. (2017). “*Regionalização de vazões*”. Porto Alegre, RS. 1^a Ed. 1^aReimp. ABRHidro, UFRGS, 2017. 256 p.
- UN- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). “*The World's Cities in 2018*”—Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417).
- UN- United Nations (2022). “*World Population Prospects 2022. Summary of Results. Department of Economic and Social Affairs, Population Division*”. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/>. Acesso em: mar, 2024.