

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES NATURAIS DE RIOS DA AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

Larissa de Castro Ribeiro¹; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva²; Walter Collischonn³; Mino Viana Sorribas⁴; Cléber Henrique de Araújo Gama⁵ & Leonardo Rodolfo Paul⁶

Palavras-Chave – índices hidrológicos, caracterização de vazões, escala continental

INTRODUÇÃO

Os rios prestam importantes serviços ambientais relacionados à preservação e sustentação dos ecossistemas aquáticos (Bunn and Arthington, 2002; Poff et al., 1997), e por sua vez, sustentam atividades humanas socioeconômicas como o abastecimento de água de cidades, navegação, suprimento para a indústria, agricultura e geração de energia elétrica. Estes serviços ambientais e socioeconômicos possuem uma certa dependência do comportamento dos rios, pois esse comportamento nos dá um panorama da disponibilidade hídrica e da extensão da variabilidade das vazões (Poff et al., 1997).

O comportamento dos rios pode ser compreendido e caracterizado através do estudo do regime de vazões, que é descrito pelo padrão das características das séries de vazões de um rio como a magnitude, previsibilidade (regularidade de ocorrência) e variabilidade das vazões. A mudança dessas características do regime de vazões pode ameaçar a integridade dos ecossistemas aquáticos e causar impactos na dependência dos rios para as atividades humanas socioeconômicas, devido a imprevisibilidade dinâmica das séries de vazões (Poff et al., 1997).

Séries de vazão podem ser obtidas através de medições *insitu*, porém, na América do Sul a muitos dos rios não são monitorados ou os dados de vazões existentes possuem baixa representatividade temporal. Estas limitações para obter dados de vazões *insitu* se devem a aspectos físicos, técnicos e financeiros (Tucci, 2002), além disto, estas medições de vazões tendem a apresentar incertezas com erros em torno de 6% a 20% (Clark et al., 2008; Herschy, 2002), dificultando um estudo mais aprofundado do regime de vazões. Modelos hidrológicos são uma alternativa para estimar as vazões em locais não monitorados, sobretudo em escala continental (Sivapalan et al., 2003; Wood et al., 2011; Bierkens, 2015; Bierkens et al., 2015; Sood and Smathkin, 2015), e sendo adequados para análise de séries diárias no estudo de regimes de vazões (Melles et al. 2014), complementando o papel dos postos de monitoramento, obtendo informações em mais locais.

Através da caracterização do regime de vazões utilizando **índices hidrológicos**, podemos analisar o comportamento dos rios, e regiões hidrográficas (Chagas et al., 2020; Siddiqui et al., 2021). Esses índices (e.g. assinaturas hidrológicas e vazões de referência) fornecem informações relevantes

1) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, larissa.ribeirocr@gmail.com

2) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, rodrigo.paiva@ufrgs.br

3) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, collischonn@iph.ufrgs.br

4) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mino.sorribas@gmail.com

5) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cleber.hag@gmail.com

6) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, leonardorpaul@gmail.com

sobre o comportamento hidrológico, dando ferramentas para identificar padrões, processos dominantes e a sua intensidade e influência destas características de vazões nos ecossistemas aquáticos.

A comunidade científica vem apresentando estudos de caracterização de rios e bacias utilizando índices hidrológicos em escalas local, continental e global. Em geral, a caracterização é realizada somente em regiões pontuais de locais monitorados que possuem medições de vazões (David et al., 2019; Jehn et al., 2020), e utilizando vazões médias mensais estimadas por modelagem hidrológica (Ouellet Dallaire et al., 2018). Contudo, estes trabalhos possuem algumas limitações, como a caracterização pontual do regime hidrológico, apresentando resultados que não podem ser utilizados para toda uma região, e a não capacidade de diferenciar rios grandes de menores.

Neste contexto, ainda não há estudos que caracterizam o regime de vazões da América do Sul através de índices hidrológicos, utilizando séries de vazões naturais em escala temporal diária, simuladas através de modelagem hidrológica, também avaliando o desempenho da modelagem ao representar o regime natural de vazões dos rios. Este trabalho é um resumo de uma dissertação de mestrado em andamento. O objetivo deste trabalho será preencher essa lacuna através da caracterização do regime hidrológico dos rios da América do Sul com base em séries históricas de vazões estimadas por modelagem hidrológica em escala continental, gerando uma base de dados com os índices hidrológicos dos grandes rios da América do Sul e realizar a avaliação da modelagem hidrológica na representação de índices hidrológicos. As séries de vazões serão obtidas através de modelagem hidrológica em escala continental, com resultados do Modelo de Grandes Bacias (MGB) apresentados por Siqueira et al. (2018). Realizar este estudo contribuirá para o conhecimento de processos hidrológicos dessa região e ajudaria a entender como o regime se relaciona estes processos, através da análise das características do regime de vazão dos rios.

METODOLOGIA

Na metodologia deste trabalho foram realizadas etapas de obtenção da base de dados com as séries de vazões simuladas através de modelagem hidrológica e com as séries observadas de postos fluviométricos. Para realizar a caracterização do regime hidrológicos dos rios foram calculados os índices hidrológicos das séries de vazões simuladas e observadas. Posteriormente foi verificada a acurácia da modelagem hidrológica ao representar os índices hidrológicos comparando os índices simulados e observados e fora realizada uma análise dos índices hidrológicos simulados para os rios da América do Sul. A proposta metodológica deste trabalho se dá em três etapas que serão apresentadas mais detalhadamente a seguir.

1) Base de dados

Foram utilizadas as vazões diárias naturais estimadas para a América do Sul apresentadas por Siqueira *et al.* (2018) utilizando o modelo MGB. As vazões obtêm uma série contínua de 35 anos (compreendidos entre 1980 a 2015). Conforme apresentado por Siqueira *et al.* (2018), as séries geradas foram consideradas satisfatórias em termos de Nash-Sutcliffe e eficiência de Kling-Gupta, principalmente em grandes rios e áreas úmidas. Nas vazões obtidas por essa metodologia da modelagem hidrológica não foram consideradas mudanças climáticas e mudanças nos regimes de vazões devido às ações antrópicas.

Para escolha das estações fluviométricas com série de vazões observadas no período de 1980 a 2015, fora utilizada a base de dados da ANA (Agência Nacional de Águas) e do ONS (Operador Nacional do Serviço Elétrico), para a região do Brasil. Para os outros países foram utilizados outras

fontes de dados, com a mesma série histórica e filtragem de qualidade dos dados, resultando ao total de 1329 postos fluviométricos.

Para o cálculo de alguns índices hidrológicos foi utilizado dados de precipitação do MSWEP v2.1 (Beck et al., 2017), onde foi realizada uma média da precipitação diária para cada trecho de rio analisado e para cada local dos postos fluviométricos.

2) Cálculo dos índices hidrológicos

Para realizar a caracterização do regime de vazões dos rios da América do Sul, foram utilizados índices hidrológicos. No total foram 96 índices analisados, apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir. Para cada índice também foi calculado seu coeficiente de variação e desvio padrão. Serão analisados nesse resumo apenas 6 índices hidrológicos.

Tabela 1. Índices hidrológicos separados em grupos.

Grupo	Índice hidrológico
G1 - Magnitude das médias	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro
	Vazão média (Q_m)
	Coefficiente de Escoamento (RQP)
G2 - Magnitude dos extremos	Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias (mm/dia)
	Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias (mm/dia)
	Índice de vazão de base (IQB)
	Frequência de vazões igual a zero
	Vazão máxima de referência Q_5
	Vazão mínima de referência Q_{95}
	Vazão máxima de referência normalizada $Q_{10/Q50}$
	Frequência de vazões altas
	Duração de vazões altas
	Frequência de vazões baixas
	Duração de vazões baixas
G3 - Timing dos extremos	Data da vazão mínima
	Data da vazão máxima
G5 - Gradiente das variáveis no tempo	Taxa de ascensão
	Taxa de recessão
	Número de reversões
	Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)
	Elasticidade da vazão (EQP)
	Índice de assimetria do hidrograma (s)
Coefficiente de recessão da vazão de base (k)	

3) Análise da acurácia da modelagem hidrológica nas estimativas das assinaturas hidrológicas

Para a avaliação da representatividade dos índices hidrológicos estimados pela modelagem hidrológica, foram calculados o erro relativo (em módulo) e a correlação dos índices obtidos através das séries de vazões simuladas em relação aos índices obtidos através das séries de vazões observadas.

O erro relativo normalizado (ER) é a relação entre a variável X observada (índices hidrológicos dos postos fluviométricos) e a variável Y estimada (índices hidrológicos estimados por modelagem). De acordo com a métrica apresentada na Equação 1, os resultados indicam a magnitude em módulo do erro, em porcentagem, levando em consideração o desvio padrão dos dados observados como um fator de normalização.

$$ER = \frac{|Y-X|}{DPX} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

onde ER é Erro Relativo; X é valor observado (índice hidrológico observado); Y é o valor estimado (índice hidrológico simulado); e DPX é o desvio padrão do valor observado.

Na análise da correlação foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre as estimativas obtidas via séries de vazões simuladas e observadas nos postos fluviométricos. Considerando que os postos fluviométricos são distribuídos de forma irregular (e.g. muitos postos na região sudeste e poucos na região norte), considerou-se a densidade espacial de postos fluviométricos para evitar análise tendenciosa. Para tanto, assume-se que a densidade de postos em uma determinada região é dada por:

$$a = \frac{A}{n} \quad (3)$$

onde a é a densidade de postos por área, A [km²] é a área da região entorno ao posto analisado e n é o número de postos na área. Nesse estudo foi utilizada uma área de 500 km x 500 km.

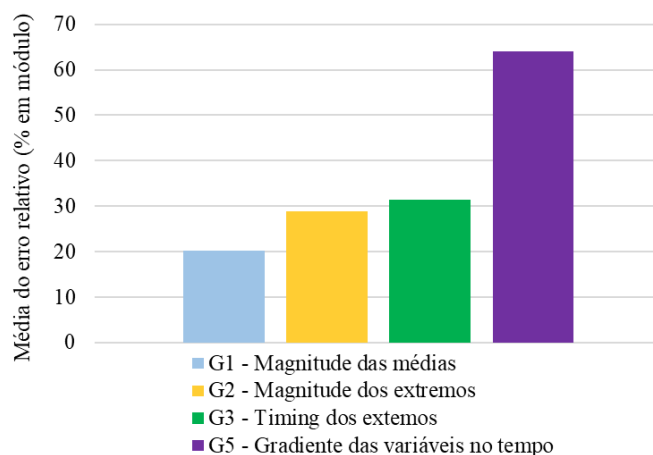
Assim, a densidade de postos serve como ponderação para o cálculo do coeficiente, resultando na equação 4.

$$\rho_{modificado} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{X}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n a_i (Y_i - \bar{Y}_i)^2}} \quad (4)$$

RESULTADOS

Para termos uma visão geral da acurácia em relação aos grupos dos índices, a Figura 1 apresenta a média das medianas dos erros de cada assinatura. Nesta análise podemos observar que o grupo G5 obteve a maior média de erros e o grupo G1 a menor.

Figura 1 - Média dos erros dos índices separados por grupos.



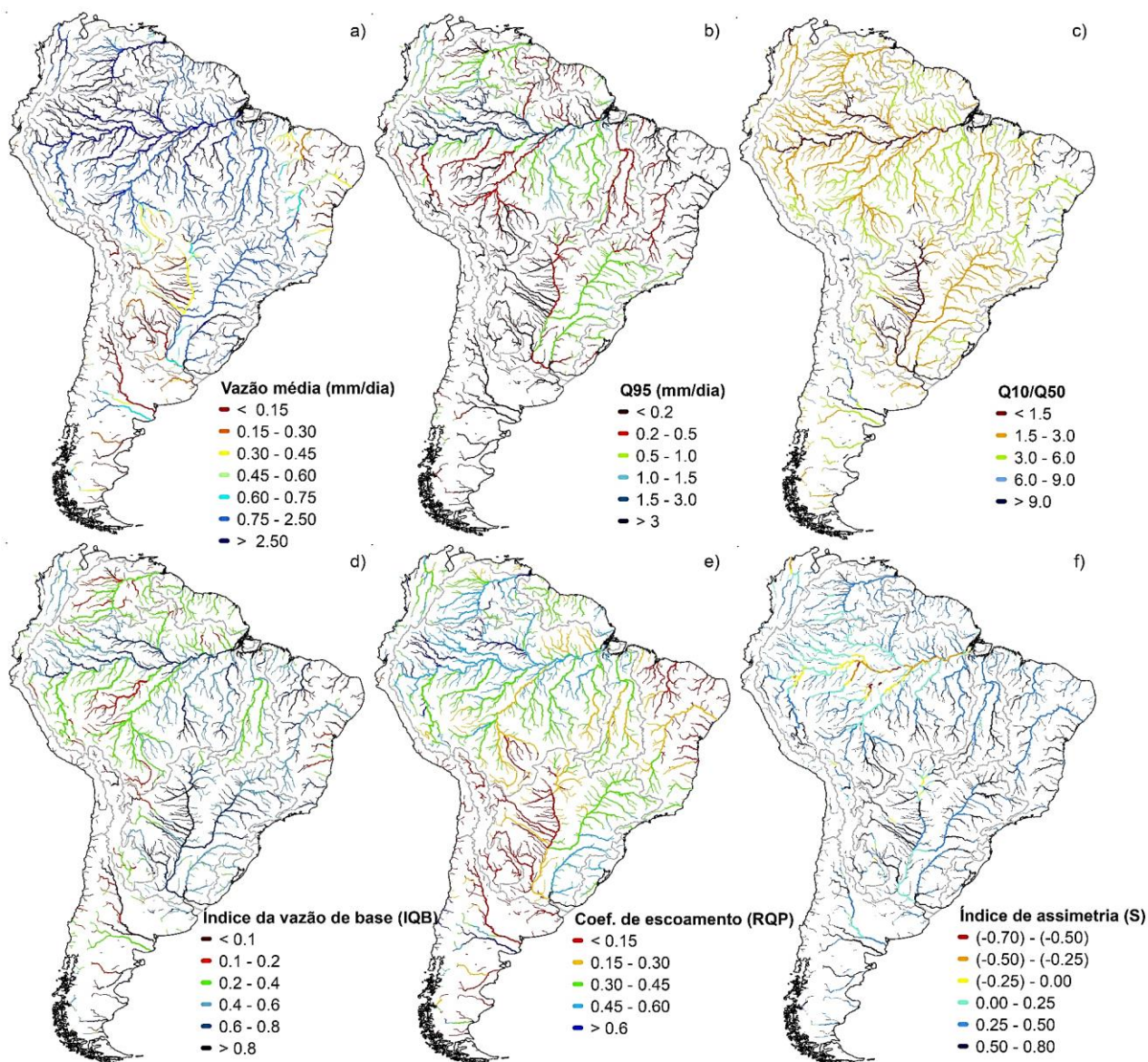
A Tabela 2 apresenta a correlação de alguns dos índices hidrológicos analisados neste trabalho. Nos valores de correlação encontrados, que variam de 0.89 a 0.04, temos uma mediana de 0.73, que corresponde a uma boa correlação positiva.

Tabela 2. Correlação calculada de alguns dos índices hidrológicos.

Índice hidrológico	Correlação
Vazão média	0.89
Coefficiente de Escoamento (RQP)	0.77
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	0.04
Vazão máxima de referência Q ₅	0.83
Vazão mínima de referência Q ₉₅	0.83
Vazão mínima de 1 dia	0.76
Coefficiente de variação da vazão mínima de 1 dia	0.20
Vazão máxima de 1 dia	0.73
Coefficiente de variação da vazão máxima de 1 dia	0.77
Taxa de ascensão	0.75
Taxa de recessão	0.72
Índice de assimetria do hidrograma (s)	0.72
Índice de vazão de base (IQB)	0.51
Elasticidade da vazão (EQP)	0.12
Vazão máxima de referência normalizada Q ₁₀ /Q ₅₀	0.23
Mediana	0.73

Os resultados para os seis índices hidrológicos selecionados são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Índices hidrológicos obtidos para rios da América do Sul.



Resultados filtrados para rios com área de drenagem > 5.000 km²

Os resultados da vazão média (Figura 2a), onde em geral, as maiores vazões médias são encontradas nas cabeceiras dos afluentes do Rio Amazonas e uma das menores na região nordeste, no rio Parnaíba. Este índice pode estar diretamente relacionado ao índice pluviométrico, pois a região amazônica é uma das mais chuvosas da América do Sul e o nordeste do Brasil sendo uma das regiões menos chuvosas.

Na análise dos resultados obtidos da vazão de referência mínima Q_{95} , ilustrado na Figura 2b, a vazão mínima pode estar relacionada ao índice pluviométrico e a aridez da região, pois na região

do rio Amazonas, com alta umidade e índice pluviométrico, os valores para a Q_{95} são maiores em comparação com a região Nordeste, que é árida e com baixos índices pluviométricos.

Para o índice de vazão máxima normalizada pela vazão média Q_{10}/Q_{50} (Figura 2c), há locais onde a vazão de cheia é expressivamente maior, cerca de 9 vezes, se comparada com a vazão mediana, como, por exemplo, na região nordeste do Brasil. Na região sul do Brasil os valores da Q_{10}/Q_{50} obtidos indicam que as vazões máximas são cerca de 3 a 6 vezes maiores que a mediana das vazões.

A variabilidade espacial do Índice de Vazão de Base IQB é ilustrado na Figura 2d. Valores mais elevados indicam rios com alta contribuição de vazão de base em seu regime de vazões. Por exemplo, valores altos são encontrados no Rio Jurena e um baixo valor no Rio Purus, ambos sendo afluentes do Rio Amazonas. Analisando os resultados, este índice possui correlação negativa a Q_{10}/Q_{50} .

O coeficiente de escoamento é apresentado na Figura 2e. Quanto mais alto o valor desse índice, provavelmente maior é a porcentagem da chuva que entra no sistema e sai como escoamento, quanto menor, provavelmente a chuva que entra sai em grande parte como evapotranspiração ou infiltração. Neste índice, em geral, regiões mais úmidas obtêm maiores valores e em regiões mais áridas obtêm menores valores do coeficiente de escoamento.

Na Figura 2f são apresentados os resultados do índice de assimetria do hidrograma. Quanto menor o valor desse índice, maior o indicativo de ser uma região com planícies inundáveis. Os resultados no Rio Amazonas e no Rio São Lourenço (na região do Pantanal) possuem assimetria negativa, e são regiões que possuem grandes planícies inundáveis.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma caracterização do regime hidrológico dos rios da América do Sul com base em séries históricas de vazões naturais estimadas por modelagem hidrológica em escala continental, gerando uma base de dados com os índices hidrológicos dos grandes rios da América do Sul e apresentou a avaliação da modelagem hidrológica na representação de índices hidrológicos.

Os resultados obtidos para a análise dos índices hidrológicos nos permitiram observar padrões de comportamento do regime de vazões dos rios, relacionados como por exemplo a clima e hidrogeologia, além de relações entre os próprios índices.

Nos resultados obtidos da acurácia da modelagem hidrológica a mediana da correção calculada de 15 índices analisados foi de 0.73. Dentre os índices com melhor correlação e menor mediana de erro se destacam a vazão média, com mediana de erro de 24% e $r = 0.89$, a vazão mínima de referência Q_{95} , com mediana de erro de 27% e $r = 0.83$, e o coeficiente de escoamento com mediana de erro de 34% e $r = 0.77$.

Com isto, podemos concluir que as séries de vazões estimadas por modelagem hidrológica possuem representações satisfatórias dos índices hidrológicos apresentados e, dentre as contribuições deste trabalho, podemos destacar a apresentação dos índices hidrológicos, que poderão ser utilizados como uma ferramenta para o conhecimento de processos hidrológicos, encorajando mais estudos hidrológicos e também poderá ser usado como uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos em escala regional, nacional e continental da América do Sul.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2013). “*Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos*”. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/manual-de-outorga.pdf>.

Beck, H.E.; van Dijk, A.I.J.M.; Levizzani, V.; Schellekens, J.; Miralles, D.G.; Martens, B.; de Roo, A. Msweb: 3-hourly 0.25 degrees global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017, 21, 589–615.

Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L. E., David, C. H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J. S., Flörke, M., Gochis, D. J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R. M., Reager, J. T., Samaniego, L., Sudicky, E., Sutanudjaja, E. H., van de Giesen, N., Winsemius, H., and Wood, E. F (2015). “*Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next*”. *Hydrol. Process.*, 29, 310–320.

Bierkens, M. F. P (2015). “*Global hydrology 2015: State, trends, and directions*”. *Water Resour. Res.*, 51, 4923–4947.

Bunn, Stuart E.; Arthington, Angela H (2002). “*Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity*”. *Environmental management*, v. 30, n. 4, p. 492-507. 2002.

Clark, M.P., Rupp, D.E., Woods, R.A., Zheng, X., Ibbitt, R.P., Slater, A.G., Schmidt, J., Uddstrom, M.J. (2008). *Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model*. *Adv. Water Resour.* 31, 1309–1324.

Chagas, V. B., Chaffe, P. L., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C., & Siqueira, V. A (2020). “*CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil*”. *Earth System Science Data*. doi.org/10.5194/essd-2020-67.

David, P. C., D. Y., Chagas, V. B. P., Luiz, P., & Chaffe (2019). “*Uso De Assinaturas Hidrológicas Para Classificação De Bacias Hidrográficas Do Brasil*”. XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos.

Herschy, R.W. (2002). “*The uncertainty in a current meter measurement*”. *Flow Meas. Instrum.* 13, 281–284.

Jehn, F. U. et al. (2020). “*Using hydrological and climatic catchment clusters to explore drivers of catchment behavior*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 3, p. 1081-1100.

Melles S J, Jones N E and Schmidt B J (2014). “*Evaluation of current approaches to stream classification and a heuristic guide to developing classifications of integrated aquatic networks*”. *Environ. Manage.* 53 549–66.

Ouellet-Dallaire, C., Lehner, B., Sayre, R., & Thieme, M (2019). “*A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution*”. *Environmental Research Letters*.

Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks, and J. C. Stromberg (1997). “*The natural flow regime*”. *BioScience* 47:769–784.

Tucci, Carlos E.M (2002). “*Regionalização de vazões*”. Editora da Universidade. UFRGS. 1ª edição. Porto Alegre.

Siddiqui, Sharmin F. et al. (2021). “*Classifying flow regimes of the Amazon basin. Aquatic Conservation*” *Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 31, n. 5, p. 1005-1028.

Siqueira, V. A. et al. (2018). “*Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*”. *Hydrology and Earth System Sciences*. Göttingen: Copernicus. Vol. 22, n. 9 (set. 2018), pp. 4815-4842. 2018.

Sivapalan, Murugesu (2003). “*Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology*”. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 15, p. 3163-3170. 2003.

Sood, A. and Smakhtin, V (2015). “*Global hydrological models: a review*”. *Hydrol. Sci. J.*, 60, 549–565.

Wood, E. F., Roundy, J. K., Troy, T. J., van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Blyth, E., de Roo, A., Doll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffe, P. R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D. P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., and Whitehead, P (2011). “*Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water*”. *Water Resour. Res.*, 47, W05301.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à ANA pelo financiamento através do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”. Também agradecem à CAPES e ao grupo HGE-IPH (Hidrologia de Grande Escala-IHP-UFRGS).