

ALTERNATIVAS PARA ATENUAR OS RISCOS ASSOCIADOS À EXTRAPOLAÇÃO ESPACIAL NA REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Aline de Araújo Nunes^{1}; Fernando Falco Pruski²; Fernando Silva Rego³*

Resumo - A regionalização é uma importante ferramenta para o conhecimento hidrológico espacial, mas existem limitações expressivas para a extrapolação de seus resultados, principalmente em bacias de menor porte, visto que a maioria das estações fluviométricas está localizada em seções da hidrografia às quais estão associadas grandes áreas de drenagem. Este trabalho tem por objetivo apresentar alternativas para minimizar os riscos associados à extrapolação das equações de regionalização das vazões mínimas. O estudo foi realizado para uma sub-bacia do rio Paranaíba. Foi avaliado o desempenho de duas variáveis explicativas para a regionalização da Q_{95} . A característica física da bacia utilizada foi a área de drenagem. A variável climática utilizada foi a precipitação menos um fator de abstração correspondente a 750 mm (P_{eq750}). Foi apresentada, também, uma imposição de um valor limite de vazão mínima específica para impor uma restrição às vazões mínimas em regiões de extrapolação. A substituição da área pela P_{eq750} como variável explicativa promoveu diferenças expressivas tanto nas estatísticas das equações de ajuste como no comportamento da Q_{95} . O uso de um valor limite de imposição física constituiu uma importante possibilidade de estender o emprego das equações de regionalização a trechos da hidrografia onde o uso destas não é recomendado.

Palavras-Chave – Gestão dos recursos hídricos, segurança hídrica.

ALTERNATIVES FOR MITIGATE THE RISKS ASSOCIATED WITH SPATIAL EXTRAPOLATION IN STREAMFLOW REGIONALIZATION

Abstract – Regionalization is an important tool for hydrological knowledge spatial, but there are several limitations to the extrapolation of its results, especially in smaller basins, since most gauge stations are located in hydrographic sections for which are associated large drainage areas. This study aimed to present alternatives to minimize risks associated with the extrapolation of regionalization equations for low flows. The study was conducted for a sub-basin of Paranaíba river basin. The performance of new explanatory variables was evaluated for Q_{95} regionalization. The physical characteristic used was the drainage area. The climatic variable considered was the rainfall minus an abstraction value, which is 750mm (P_{eq750}). It's also presented an imposition of a low flow threshold specific to impose a restriction for low flows in extrapolation regions. The use of P_{eq750} to replace area as explanatory variable promoted significant differences in statistics of adjustment equations and Q_{95} behavior. The use of a threshold value of physical imposition was an important possibility to extend the use of regionalization equations along hydrography sections where the use of these equations was not recommended.

Keywords – Management of water resources, water safety.

^{1*} Eng^a Agrícola e Ambiental, Mestre em Engenharia Agrícola, Estudante de Pós-Graduação - Depto. Engenharia Agrícola/UFV, CEP 36570-000 Viçosa-MG. Correio eletrônico: alinedearajonunes@gmail.com

² Eng^o Agrícola, Pós-Doc, Prof. Tit. UFRV - Depto. Engenharia Agrícola, CEP 36570-000 Viçosa-MG. Correio eletrônico: ffruski@ufv.br

³ Eng^o Ambiental, Mestrando em Meteorologia Agrícola /UFV - Depto. Engenharia Agrícola/Bolsista CNPq, CEP 36570-000 Viçosa-MG. Correio eletrônico: fernando.rego@ufv.br

INTRODUÇÃO

Para a estimativa das vazões é necessário conhecimento dos dados históricos, porém estas informações muitas vezes não estão disponíveis no local de interesse ou não representam corretamente as condições da bacia hidrográfica (Pandey e Nguyen, 1999). Logo, com o intuito de contornar esse problema, a regionalização de vazões tem sido frequentemente empregada (Masih *et al.*, 2010).

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para suprir a carência de informações hidrológicas em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados (Samuel *et al.*, 2011) sendo definida por Fill (1987) como um processo de transferência de informações de um local para outro. Essa técnica relaciona os processos hidrológicos com características físicas e climáticas de uma bacia.

A regionalização é uma importante ferramenta para o conhecimento hidrológico espacial, mas existem limitações expressivas para a extrapolação de seus resultados, principalmente em bacias de menor porte (Silva Júnior *et al.*, 2003; Tucci, 2002), visto que a maioria das estações fluviométricas estão localizadas em seções da hidrografia às quais estão associadas grandes áreas de drenagem.

Segundo Li *et al.* (2009) somente a análise estatística dos modelos de regionalização não é suficiente para estimar as vazões ao longo da hidrografia. O uso de procedimentos que auxiliem na compreensão do comportamento físico de um processo é importante para extrair maiores informações dos dados disponíveis.

O desenvolvimento de estudos que visam à representação adequada do processo de formação do escoamento de forma a fornecer subsídios para a tomada de decisão por parte dos gestores de recursos hídricos é uma das grandes demandas ambientais atuais (Santos *et al.*, 2010). O conhecimento dos processos envolvidos no balanço hídrico é necessário para a compreensão da complexidade do mesmo.

O balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser descrito em termos das entradas e saídas de água (Manning, 1997). Assumindo a precipitação como a única forma de entrada de água no sistema em uma região úmida, a equação do balanço hídrico pode ser escrita como: $\text{Evapotranspiração} = \text{Precipitação} - \text{Escoamento} \pm \text{Alterações no armazenamento}$.

Iniciada a precipitação, parte dela é interceptada pela vegetação, parte infiltra no solo e outra parte pode ser retida em depressões da superfície do terreno (Santos *et al.*, 2010). Ao longo do ano, uma parcela da precipitação que infiltrou constituirá o escoamento subterrâneo (Brodie *et al.*, 2008), sendo este processo o principal responsável pela manutenção do escoamento em períodos de estiagem. O escoamento superficial é gerado a partir do momento em que a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo (Beven e Wood, 1983).

Assim sendo, grande parte da precipitação é abstraída da formação da vazão média de longa duração. Nas vazões mínimas ainda existe uma defasagem entre as precipitações que promovem a recarga do lençol freático e as vazões evidenciadas nos períodos de estiagem.

Considerando a importância da estimativa das vazões ao longo de toda a hidrografia e as limitações associadas à extrapolação das equações de regionalização este trabalho tem como objetivo apresentar alternativas para minimizar os riscos associados à extrapolação espacial na regionalização de vazões mínimas.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo e dados utilizados

O estudo foi realizado para uma sub-bacia do rio Paranaíba. Um estudo prévio desenvolvido por GPRH e IGAM (2012) identificou 2 regiões hidrologicamente homogêneas na parte mineira da bacia do Paranaíba (Figura 1), sendo a sub-bacia de estudo identificada como região 2.

Foram utilizados dados consistidos de dez estações fluviométricas, todas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). As estações fluviométricas utilizadas no estudo estão também identificadas na Figura 1.

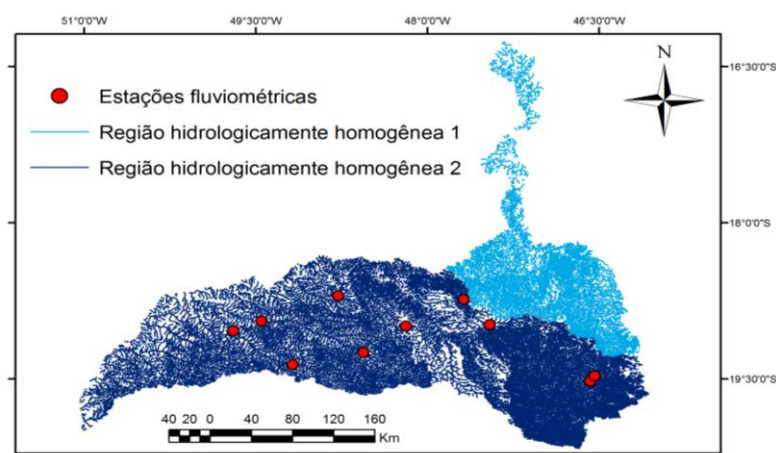


Figura 1 – Regiões homogêneas consideradas para a regionalização de vazões mínimas na bacia do Paranaíba (GPRH e IGAM, 2012).

Regionalização de vazões

A relação mais frequentemente utilizada para relacionar a vazão (Q) às características da bacia hidrográfica (A, B, \dots, M) é uma função potencial (Merz e Blöschl, 2004). O modelo de regressão múltipla é expresso por

$$Q = \alpha A^a B^b C^c \dots M^m \quad (1)$$

em que α é a constante de regressão estimada pela análise de regressão.

A variável dependente utilizada na regionalização de vazões na bacia em estudo foi a vazão mínima com 95% de permanência no tempo (Q_{95}).

As variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem (A) e a vazão equivalente ao volume precipitado considerando a abstração de uma parte da precipitação que não é convertida em vazão no curso d'água (P_{eq750}). A variável explicativa P_{eq750} representa as características físicas e climáticas da bacia. Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, a mesma não reflete efetivamente a contribuição para a formação dessas vazões. Visando a melhor representação dos processos físicos envolvidos na formação das vazões, Pruski *et al.* (2013) utilizaram o valor de 750 mm como o fator que passa a ser caracterizado como fator de abstração da precipitação na formação das vazões. 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.

A P_{eq750} foi obtida de séries históricas de precipitação oriundas de estações pluviométricas existentes na bacia do Paranaíba com período base correspondente ao mesmo período das séries de vazões, possibilitando a construção do mapa de precipitação (Figura 2) e o cruzamento desse mapa com as informações mapeadas de área de drenagem.

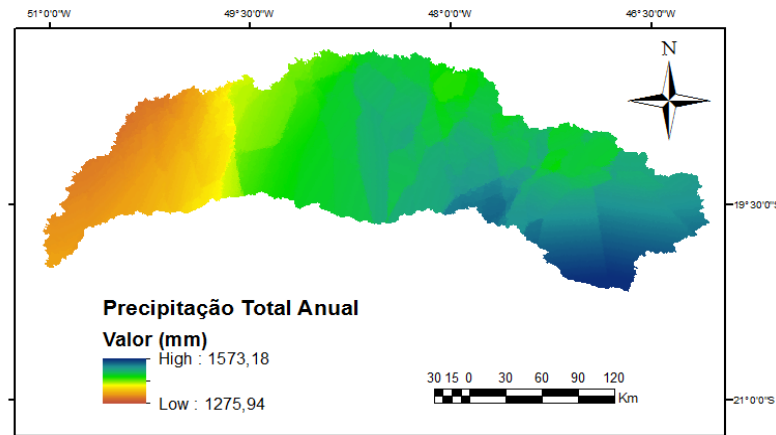


Figura 2 – Distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica em estudo.

Para a aplicação do modelo de regressão múltipla foi utilizado o software Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV 1.0), desenvolvido por Sousa (2009). Na seleção das equações que conduziram ao melhor ajuste estatístico utilizou-se, assim como Laaha e Blöschl (2005), o erro absoluto, estimado pela raiz quadrada do erro quadrático médio, o coeficiente de determinação e o erro relativo.

Imposição de restrição física para a estimativa das vazões mínimas em regiões de extrapolação

As equações de regionalização tendem a apresentar uma grande amplitude de variação nas regiões onde a extrapolação é feita, o que pode conduzir a superestimativas das vazões mínimas e, conseqüentemente, um grande risco de que demandas estabelecidas com base nestas estimativas não sejam atendidas. Para minimizar este risco é proposta a imposição de uma restrição física para a estimativa das vazões mínimas em regiões de extrapolação das equações de regionalização, e correspondente a um valor limite de vazão mínima específica. Considerou-se como valor limite de q_{95} o maior valor evidenciado nas estações fluviométricas na região hidrologicamente homogênea correspondente.

Desta forma, caso a q_{95} estimada no trecho da base hidrográfica pela equação de regionalização fosse maior que o valor limite, a Q_{95} passava a ser estimada pela equação

$$Q_{95_ajust} = q_{95} A \quad (2)$$

em que Q_{95_ajust} = vazão mínima com 95% de permanência no tempo ajustada com base na q_{95} limite, $m^3 s^{-1}$; q_{95_lim} = vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização, $m^3 s^{-1} km^{-2}$; e A = área de drenagem, km^2 .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 se apresenta a área de drenagem, a Q_{95} e a q_{95} para as dez estações fluviométricas consideradas no estudo.

Tabela 1 – Área de drenagem, Q_{95} , e Q_{95} específica para as dez estações fluviométricas consideradas no estudo.

Estação	Nome da estação	Área (km ²)	Q_{95} (m ³ /s)	q_{95} (L s ⁻¹ km ⁻²)
60145000	Iraí de Minas	82	0,52	6,39
60150000	Estrela do Sul	787	5,37	6,82
60250000	Fazenda São Mateus	1231	12,36	10,04
60265000	Ibiá	1307	10,09	7,72
60381000	Fazenda Letreiro	924	4,23	4,58
60615000	Fazenda Cachoeira	199	1,41	7,10
60835000	Fazenda Paraíso	1469	6,89	4,69
60845000	Ituiutaba	6154	34,75	5,65
60850000	Fazenda Buriti do Prata	2526	10,93	4,33
60855000	Ponte do Prata	5174	19,18	3,71

A menor área de drenagem entre as dez estações fluviométricas estudadas é de 82 km² e a q_{95} varia de 3,71 a 10,04 L s⁻¹ km⁻².

As equações 3 a 4, obtidas nas presentes condições e apresentadas em estudo de regionalização de vazões e geração de modelo para a automatização da obtenção de vazões mínimas (Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$) e média para o estado de Minas Gerais realizado por GPRH e IGAM (2012), foram as que propiciaram os melhores ajustes para a Q_{95} em função das duas variáveis independentes consideradas no estudo (A e P_{eq750}).

$$Q_{95} = 0,0114 A^{0,9035} \quad (3)$$

$$Q_{95} = 0,3125 P_{eq750}^{0,9250} \quad (4)$$

Na Tabela 2 são apresentados os valores de R^2 , do erro padrão e da amplitude do erro relativo para a Q_{95} considerando como variáveis independentes A e P_{eq750} .

Tabela 2 – R^2 , erro padrão e amplitude do erro para a Q_{95} considerando A e P_{eq750} como variáveis independentes

	A	P_{eq750}
R^2	0,949	0,964
Erro Padrão	0,295	0,248
Erro Relativo (%)	-42,5 a 35,6	-36,9 a 33,2

A utilização da variável explicativa P_{eq750} permitiu o melhor ajuste estatístico em comparação com a área, representado por maiores valores de R^2 , menores erros padrão e menores amplitudes dos resíduos.

Embora a análise estatística seja uma ferramenta importante na avaliação do comportamento dos processos hidrológicos, o uso de procedimentos que auxiliem na compreensão dos processos físicos de formação das vazões possibilita uma melhor representação dos dados disponíveis. Nas Figuras 3 e 4 é representada a variação da q_{95} ao longo da hidrografia utilizando-se como variáveis explicativas A e P_{eq750} , respectivamente. A vazão específica foi utilizada na análise a fim de permitir uma avaliação mais compreensiva da comparação entre o comportamento das vazões associadas a cada variável explicativa utilizada no estudo.

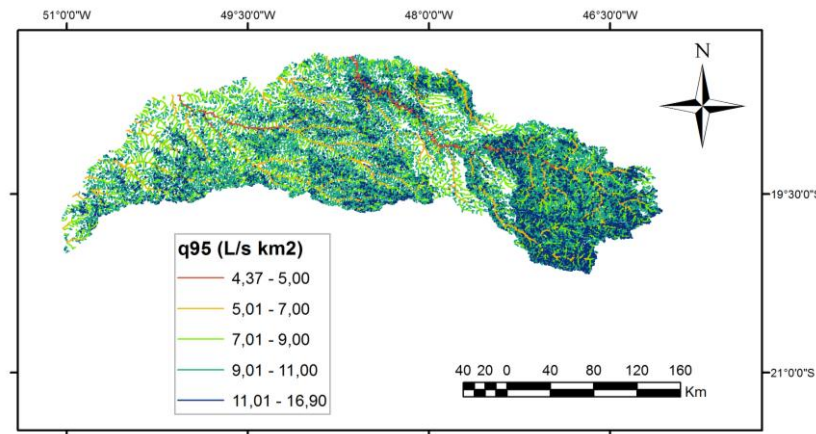


Figura 3 - Representação da variação da q_{95} ao longo da hidrografia utilizando como variável explicativa a A.

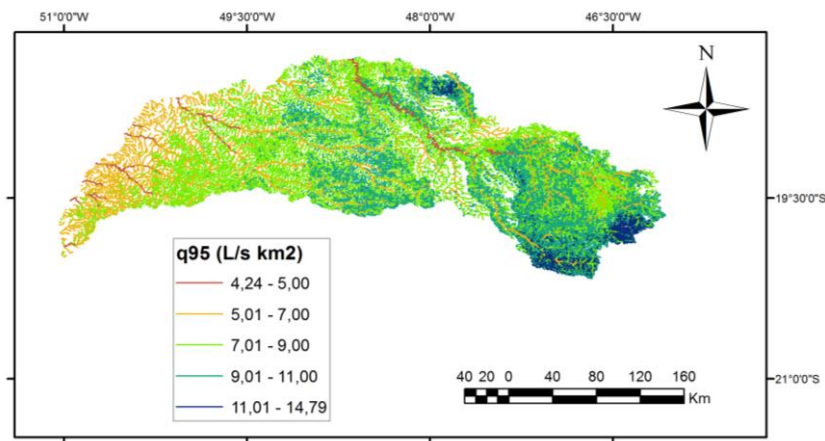


Figura 4 - Representação da variação da q_{95} ao longo da hidrografia utilizando como variável explicativa a P_{eq750} .

A utilização da área de drenagem como variável explicativa produz a obtenção de valores de q_{95} que variam de $4,37 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ a $16,90 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, sendo as q_{95} obtidas condicionadas exclusivamente a esta variável. A substituição da A pela P_{eq750} torna nítido o efeito da variação da precipitação no comportamento das vazões ao longo da hidrografia (Figura 4), acarretando, também, uma redução na amplitude de variação das q_{95} ao longo da hidrografia, bem como na própria ordem de grandeza das q_{95} estimadas, passando estas a variarem de $4,24$ a $14,79 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Este comportamento também foi evidenciado por Pruski *et al.* (2012) e Pruski *et al.* (2013).

Para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos a impossibilidade de estimativa das vazões para áreas de drenagem inferiores à menor área de drenagem dentre as estações fluviométricas consideradas, no presente caso igual a 82 km^2 , limita a possibilidade de estimar a disponibilidade hídrica a apenas uma pequena parte da hidrografia.

Embora o uso da P_{eq750} reduza o risco de extrapolação da equação de regionalização, esta ainda pode conduzir a resultados inconsistentes (Pruski *et al.*, 2012). A fim de minimizar os riscos associados à extrapolação da equação de regionalização obtida, principalmente em regiões de cabeceira, a Q_{95} foi ajustada utilizando um valor igual à maior q_{95} entre as estações fluviométricas, neste caso, igual a $0,01004 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. A Q_{95} passa a ser ajustada pela equação

$$Q_{95_ajust} = 0,01004 A \quad (5)$$

Considerando os diversos segmentos da hidrografia da região em estudo, se evidencia, para a variável P_{eq750} , que os valores das vazões específicas excedem o limite físico de $10,04 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ em 23% dos segmentos da hidrografia considerada (Figura 5).

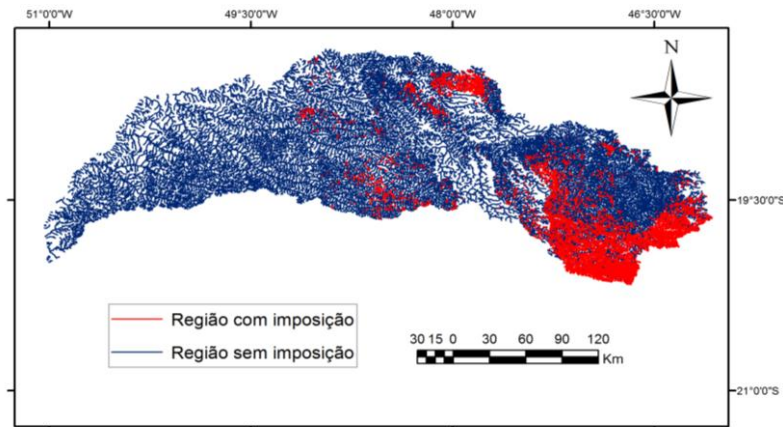


Figura 5 – Segmentos da região de estudo (destacados em vermelho) onde foi necessário o ajuste da Q_{95} (P_{eq750}), com base na vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização.

A fim de reiterar a eficiência do uso da P_{eq750} como variável explicativa no que diz respeito ao risco de extrapolação das vazões mínimas, a análise de imposição de restrição foi também aplicada às vazões estimadas com o uso da variável A. Na Figura 6 é possível observar uma porcentagem ainda maior de segmentos da hidrografia que exigem imposição quando do uso da A como variável explicativa, chegando a 58% do total de trechos.

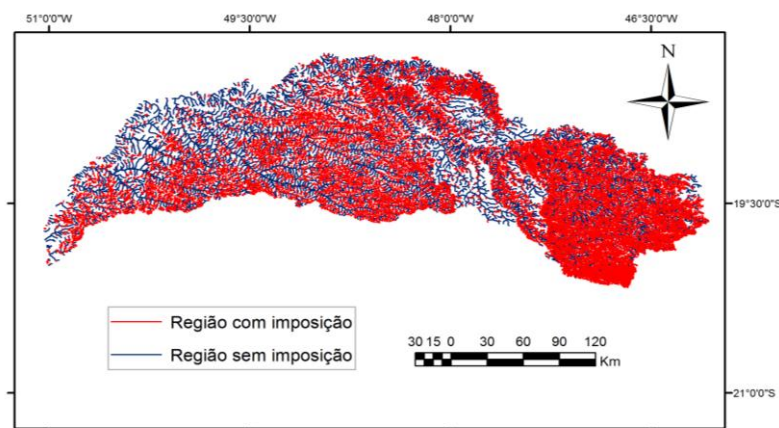


Figura 6 – Segmentos da região de estudo (destacados em vermelho) onde foi necessário o ajuste da Q_{95} (A) com base na vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização.

CONCLUSÕES

A utilização da variável P_{eq750} em substituição à área de drenagem promoveu diferenças expressivas nas estatísticas das equações de ajuste e na distribuição das vazões específicas ao longo da hidrografia. O uso desta variável também tende a minimizar o risco associado à extrapolação das equações de regionalização de vazões.

O ajuste das vazões com base em uma vazão específica limite para a extrapolação da equação de regionalização constitui uma importante possibilidade de estender o emprego das equações de regionalização a trechos da hidrografia onde o uso destas não é recomendado, sem, contudo,

comprometer a segurança do suprimento de disponibilidade hídrica e a sustentabilidade ambiental nestas regiões de imposição.

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K.; WOOD, E.F. (1983). Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*. 65, pp.139-158.
- BRODIE, R. S.; HOSTELER, S.; SLATTER, E. (2008). Comparison of daily percentiles of streamflow and rainfall to investigate stream-aquifer connectivity. *Journal of Hydrology*. 349, pp.56-67.
- FILL, H. D. (1987). *Informações Hidrológicas*. In: Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. Nobel: ABRH. cap.2, pp. 93-210.
- Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV (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. 415p.
- LAAHA, G., BLÖSCHL, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records – A comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306, pp.264-286.
- 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.
- MANNING, J.C. (1997). *Applied Principles of Hydrology*. 3rd edition, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall. 276p.
- MASIH, I.; UHLENBROOK, S.; MASKEY, S.; AHMAD, M.D. (2010). Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. *Journal of Hydrology*, 391, pp.188-201.
- MERZ, R.; BLÖSCHL, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, pp.95-123.
- NOVAES, L. F. (2005). *Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu*. Viçosa: UFV. 104p. Dissertação Mestrado.
- PANDEY, G. R.; NGUYEN, V.T.V. (1999). A comparative study of regression based methods in regional frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 225, pp.92-101.
- PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A.; REGO, F.S.; SOUZA, M. F. (2012). Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. *WRIM*, 1, pp. 51-59.
- PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A.; PRUSKI, P.L.; RODRIGUEZ, R. del G. (2013). Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. *Journal of Hydrology*, 476, pp. 52-71.
- SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. (2011). Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*. 16, 447.
- SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. (2010). Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 14, pp. 826-834.
- SILVA JÚNIOR, O.B.; BUENO, E.O.; TUCCI, C.E.M.; CASTRO, N.M.R. (2003). Extrapolação espacial na regionalização de vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8, pp. 21-37.
- SOUZA, H.T. (2009). *Sistema computacional para regionalização de vazões*. Viçosa: UFV. 86p. Dissertação de Mestrado.
- TUCCI, C.E.M. (2002). *Regionalização de vazões*. Porto Alegre, Editora Universidade UFRGS. 256 p.