
AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS E MÉDIAS
NA BACIA DO RIO ITAPEMIRIM

Evaluation of low-flow and long term average flow regionalization methods on Itapemirim river watershed

Roberto Avelino Cecílio^{1*}, Sidney Sara Zanetti², Kaio Allan Cruz Gasparini³, Cecília Neves Catrinck⁴

¹ Doutor em Engenharia Agrícola; Professor em Universidade Federal do Espírito Santo: roberto.cecilio@ufes.br

² Doutor em Produção Vegetal; Professor em Universidade Federal do Espírito Santo: sidney.zanetti@ufes.br

³ Mestre em Ciências Florestais; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: kaioallangasparini@gmail.com

⁴ Engenheira Florestal; Universidade Federal do Espírito Santo: cecicatrinc@hotmail.com

*Autor para correspondência

Artigo enviado em 23/05/2017, aceito em 20/10/2017 e publicado em 17/07/2018.

Resumo – O conhecimento das vazões mínimas e médias em qualquer seção da hidrografia de uma bacia hidrográfica é ferramenta imprescindível para um adequado planejamento e eficiente gestão dos recursos hídricos. Para este propósito destaca-se a técnica de regionalização de vazões, a qual possui diferentes métodos de aplicação, cada qual com suas vantagens e desvantagens associadas. O objetivo do presente estudo foi avaliar o desempenho de cinco diferentes métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia hidrográfica do rio Itapemirim (BHRI): Tradicional (MT); Interpolação Linear (MIL); Interpolação Linear Modificado (MILM); Chaves (MC); e Chaves Modificado (MCM). Determinaram-se, para estações fluviométricas da BHRI, os valores reais das vazões mínimas com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$), vazões mínimas com permanência de 90% do tempo (Q_{90}) e as vazões médias de longa duração (Q_{mld}). O MT apresentou melhor desempenho para a regionalização das vazões mínimas ($Q_{7,10}$ e Q_{90}). Não houve diferença expressiva no desempenho dos cinco métodos de regionalização da Q_{mld} .

Palavras-chave – deflúvio superficial, modelagem hidrológica, método tradicional.

Abstract – Knowledge of low and mean flows on any section of watershed's rivers is an important tool to water resources planning and management. Flow regionalization is a tool developed to achieve this need. However there are many methods to flow regionalization, and each one of them has its own vantages and disadvantages. This paper presents the evaluation of five different methods to the regionalization of low and mean flow on Itapemirim river watershed (BHRI). The evaluated methods were Brazilian Traditional Method (MT), Linear Interpolation Method (MIL), Modified Linear Interpolation Method (MILM), Chaves Method (MC) and Modified Chaves Method (MCM). The following reference flow were calculated to all the stream gauge stations of BHRI: minimum flows with consecutive seven days of duration and 10 years of recurrence ($Q_{7,10}$), minimum flow observed in 90% of the time (Q_{90}), long term average flow (Q_{mld}). Among the evaluated methods, MT presented better performance to predict low-flows ($Q_{7,10}$ and Q_{90}). There were no expressive differences on the accuracy of the five methods to predict Q_{mld} .

Keywords – streamflow, hydrologic modelling, traditional method.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das vazões mínimas e médias em uma bacia hidrográfica é ferramenta imprescindível para um adequado planejamento e eficiente gestão dos recursos hídricos (Novaes et al., 2009; Pruski et al., 2012), uma vez que estas caracterizam sua disponibilidade. As vazões médias são utilizadas na determinação da disponibilidade hídrica potencial de uma bacia (Arai et al., 2012; Novaes et al., 2009), enquanto as vazões mínimas caracterizam a disponibilidade hídrica natural (Smakhtin, 2001), a qual é a vazão mais crítica no sentido de atender as demandas dos múltiplos usuários.

Para obtenção de informações a respeito das vazões são necessárias estações fluviométricas, que são escassas na maioria das bacias hidrográficas do Brasil. Muitas vezes, quando existentes, os dados fluviométricos limitam-se ao rio principal da região ou em algum tributário de maior importância para propósitos de geração de energia hidroelétrica (Beskow et al., 2016). Ademais, as séries disponíveis frequentemente possuem pequena extensão (Beskow et al., 2014) e, ou, estão sujeitas a muitas falhas nos registros. Para amenizar os efeitos da escassez de informação, utiliza-se como solução prática a regionalização de vazões. A regionalização de vazões é uma técnica que tem por objetivo estimar as vazões em seções que não possuem dados fluviométricos, transferindo informações de postos fluviométricos com dados observados para os locais sem medições (Chaves et al., 2002; Laaha and Blöschl, 2006; Pruski et al., 2013; Silva Júnior et al., 2003; Tucci, 2002).

No Brasil, o método mais utilizado para a regionalização de vazões é o denominado Método Tradicional (ELETROBRAS, 1985a), o qual é aplicado em várias bacias com diferentes características (Andrade et al., 2004; Baena et al., 2004; Barbosa et al., 2005; Guedes and Hora, 2016; Lopes et al., 2017, 2016; Reis et al., 2013; Ribeiro et al., 2005). Este método baseia-se primeiramente na identificação de regiões com comportamento hidrológico homogêneo. Posteriormente, são estabelecidas equações de regressão que tem como variável dependente uma vazão de referência (mínima, média ou máxima) e como variáveis independentes, características físicas e, ou, climáticas de bacias hidrográficas.

Quando as bases de dados disponíveis em uma bacia hidrográfica são reduzidas, a utilização do Método Tradicional para a regionalização de vazões apresenta restrições (Novaes et al., 2007). Considerando que grande parte das bacias hidrográficas brasileiras possui escassez ou até mesmo ausência de informações, a reduzida precisão deste método de regionalização, neste caso, pode torná-lo não recomendável (Chaves et al., 2002; Novaes et al., 2007). Assim, há necessidade da utilização de metodologias alternativas de regionalização de vazões que proporcionem melhor confiabilidade.

Nessa linha, diferentes autores vêm desenvolvendo diversas metodologias (Chaves et al., 2002; ELETROBRAS, 1985b; Novaes et al., 2007; Pruski et al., 2013, 2012), com o

intuito de superar as limitações das bases de dados existentes na maioria das bacias hidrográficas brasileiras. Dentre essas metodologias, destaca-se a metodologia baseada na interpolação linear (ELETROBRAS, 1985b), a qual permite obter as vazões relativas à seção de interesse utilizando as vazões correspondentes às seções fluviométricas mais próximas.

Chaves et al. (2002) desenvolveram outra metodologia de regionalização, a qual utiliza de interpolação e extrapolação de vazões, de acordo com a posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, dentro da mesma bacia hidrográfica. Posteriormente, estes dois métodos foram modificados com a inclusão da precipitação média anual como uma variável auxiliar de estimativa (Novaes et al., 2007).

O Espírito Santo, assim como boa parte do Brasil, carece de informações consistentes com respeito ao comportamento hidrológico das bacias. Uma das bacias mais importantes e com disponibilidade de quantidade razoável de postos de monitoramento fluviométrico é a do rio Itapemirim, com a uma estação a cada 545 Km², adequado de acordo com o limite de 1.000 Km² por estação (World Meteorological Organization, 2008). Cerca de 14% da população capixaba encontra-se nesta bacia, sendo a economia fortemente baseada na extração e beneficiamento de mármore e granito, na produção industrial sucroalcooleira e na produção agropecuária. Os conflitos existentes são relacionados com a necessidade de preservação ambiental, principalmente a preservação de rios para obtenção de água potável suficiente e seu gerenciamento racional de modo a atender os múltiplos usuários.

Nesse contexto, acredita-se que informações consistentes com respeito à regionalização de vazões nessa bacia contribua sobremaneira para a gestão dos recursos hídricos do território capixaba. Do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral a avaliação do desempenho de cinco diferentes métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área em estudo (Figura 1) compreende a bacia hidrográfica do rio Itapemirim (BHRI), situada na região sul do Estado do Espírito Santo, entre os meridianos 40°48' e 41°52' de longitude Oeste e entre os paralelos 20°10' e 21°15' de latitude Sul. A BHRI drena as águas de uma área de 5.919,5 km², abrangendo total ou parcialmente 19 municípios, sendo um destes em Minas Gerais.

A região é caracterizada por relevo acidentado, sendo predominantes os tipos climáticos Cwa (subtropical de inverno seco e verão quente) e Cwb (subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno), de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). A

precipitação anual média na BHRI é de cerca de 1.341 mm (Lima et al., 2008).

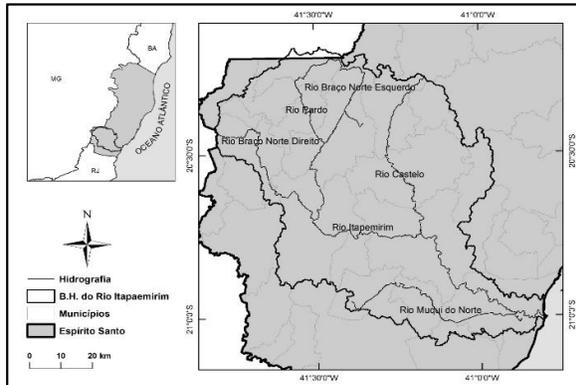


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, no estado do Espírito Santo.

Dados utilizados

Utilizaram-se dados diários de vazão observados em onze estações fluviométricas (Tabela 1 e Figura 2), no período de 1984 a 2011 (28 anos), disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológicas - HydroWeb (Agência Nacional de Águas, 2016).

Tabela 1. Estações fluviométricas da bacia do rio Itapemirim utilizadas no estudo.

Código	Estação	Curso d'água	Área de drenagem (Km ²)
57490000	Castelo	Rio Castelo	975,4
57650000	Fazenda Cacheta	Rio Muqui do Norte	480,8
57476500	Fazenda Laginha	Rio Castelo	435,8
57420000	Ibitirama	Rio Braço Norte Direito	341,5
57400000	Itaici	Rio Braço Norte Esquerdo	1045,4
57360000	Iúna	Rio Pardo	432,3
57450000	Rive	Rio Itapemirim	2218,4
57370000	Terra Corrida Montante	Rio Pardo	586,5
57350000	Usina Fortaleza	Rio Braço Norte Esquerdo	195,8
57580000	Usina Paineiras	Rio Itapemirim	5167,9
57550000	Usina São Miguel	Rio Castelo	1458,8

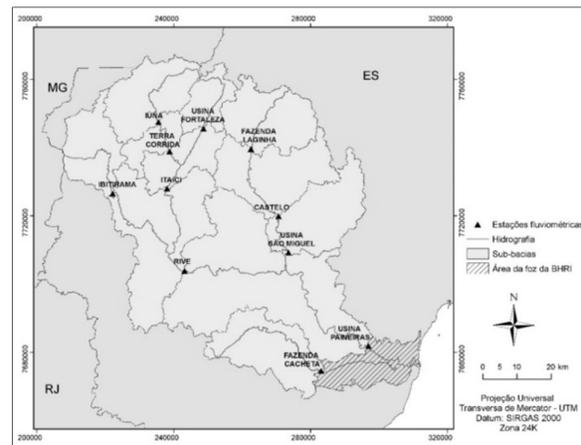


Figura 2. Estações fluviométricas da bacia do rio Itapemirim utilizadas no estudo.

Utilizando-se das séries históricas de vazões, foram determinadas, para cada estação fluviométrica, as seguintes vazões de referência: o valor mínimo das vazões médias de 7 dias consecutivos, com tempo de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$); vazão mínima com permanência de 90% do tempo (Q_{90}) e vazão média de longa duração (Q_{mld}). Para tais determinações utilizou-se o aplicativo computacional SisCAH 1.0 (Sousa et al., 2009), tomando-se todo o período de medições (Tabela 1) e descartando os meses com mais de 5% de falhas. Os valores de cada vazão obtidos nessa etapa consistiram naqueles tomados como reais para a comparação das metodologias de regionalização de vazões.

Os dados de precipitação médios anuais foram obtidos das séries históricas diárias do período de 1984 a 2011, de 29 estações pluviométricas do Espírito Santo e estados vizinhos. Tais postos são pertencentes às redes de estações meteorológicas do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e da Agência Nacional de Águas (ANA). De posse dos dados de precipitação pluviométrica esta foi especializada por meio da geoestatística, conforme indicado por Gasparini (2014), sendo obtida a média anual de todo o período para a área de drenagem de cada estação fluviométrica.

Métodos de regionalização

Avaliaram-se cinco métodos de regionalização para estimativa das vazões de referência: Método Tradicional – MT (ELETROBRAS, 1985a); Método da Interpolação Linear – MIL (ELETROBRAS, 1985b); Método da Interpolação Linear Modificado – MILM (Novaes et al., 2007); Método de Chaves - MC (Chaves et al., 2002) e Método de Chaves Modificado – MCM (Novaes et al., 2007).

Método tradicional

O procedimento empregado na utilização do MT envolve, primeiramente, a definição prévia das regiões

hidrológicamente homogêneas e, em uma segunda etapa, a obtenção das equações que permitam associar as vazões com variáveis topológicas e, ou, climáticas.

Na definição de regiões hidrológicamente homogêneas, adotaram-se os critérios de Euclides et al., (2001). O primeiro dos critérios é baseado na análise da distribuição de frequência das vazões adimensionalizadas e o segundo critério é baseado na análise do ajuste de modelos de regressão linear múltipla entre as séries de vazões e as diferentes características topológicas e climáticas (pluviométricas) das bacias.

Posteriormente, para cada região hidrológicamente homogênea identificada, foram ajustadas equações de regressão do tipo potencial, a qual é a mais frequentemente aplicada (Samuel et al., 2011).

As variáveis dependentes utilizadas individualmente na regionalização de vazões da BHRI foram a $Q_{7,10}$, a Q_{90} e a Q_{mld} . Três diferentes equações foram ajustadas para cada tipo de vazão (variável dependente), sendo que cada uma considerou uma diferente variável independente. As variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem (A_d), a vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}) (Equação 3) e a vazão equivalente ao volume precipitado, considerando-se a abstração de uma parte da precipitação que não é convertida em vazão no curso d'água (P_{eq750}) (Equação 4) (Pruski et al., 2012). A consideração da área de drenagem como variável independente deve-se ao fato de que esta é de fácil obtenção e que diversos autores a utilizaram em seus estudos, com bons resultados em bacias sob diferentes condições edafoclimáticas (Andrade et al., 2004; Baena et al., 2004; Euclides et al., 2001; Guedes and Hora, 2016; Lopes et al., 2017, 2016; Reis et al., 2013; Ribeiro et al., 2005).

$$P_{eq} = \frac{P_a A_d}{31536} \quad (3)$$

$$P_{eq750} = \frac{(P_a - 750) A_d}{31536} \quad (4)$$

em que, P_{eq} : vazão equivalente ao volume precipitado, $m^3 s^{-1}$; P_a : precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm; A_d : área de drenagem, km^2 ; e P_{eq750} : vazão equivalente ao volume precipitado, considerando-se a subtração do fator de abstração de 750 mm da precipitação para a formação das vazões (considerado igual a 750 mm, conforme preconizado em Pruski et al. (2012)), $m^3 s^{-1}$.

Para a verificação do ajuste das equações foram considerados o coeficiente de determinação, a raiz quadrada do erro quadrático médio e o erro padrão de estimativa.

Método da interpolação linear

Para a aplicação do MIL foram considerados quatro casos distintos, exemplificados a partir da Figura 3. Nos casos 1 e 2, em que a seção fluviométrica para a qual deseja-se estimar a vazão esteja imediatamente à montante ou imediatamente à jusante da estação fluviométrica, a vazão foi estimada pela Equação 5. Nos casos em que a seção

fluviométrica de interesse situa-se em um trecho de rio entre duas estações fluviométricas (caso 3), a vazão foi calculada pela Equação 6. A quarta situação (caso 4) ocorre quando o ponto de interesse está localizado em um trecho de rio afluente, cuja foz está entre dois postos fluviométricos situados em um rio de ordem superior. Neste caso, aplicou-se uma combinação de duas situações descritas anteriormente (casos 3 e 1), sendo primeiramente calculada a vazão na seção de confluência (Equação 6) e, em seguida, utilizada a Equação 5 para estimar a vazão na seção de interesse.

$$Q_z = \left(\frac{Q_{m,j}}{A_{m,j}} \right) A_z \quad (5)$$

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (6)$$

em que, Q_z : vazão na seção de interesse, $m^3 s^{-1}$; $Q_{m,j}$: vazão no posto de montante ou de jusante, $m^3 s^{-1}$; Q_m : vazão no posto de montante, $m^3 s^{-1}$; Q_j : vazão no posto de jusante, $m^3 s^{-1}$; A_z : área de drenagem na seção de interesse, km^2 ; $A_{m,j}$: área de drenagem do posto de montante ou de jusante, km^2 ; A_m : área de drenagem do posto de montante, km^2 ; e A_j : área de drenagem do posto de jusante, km^2 .

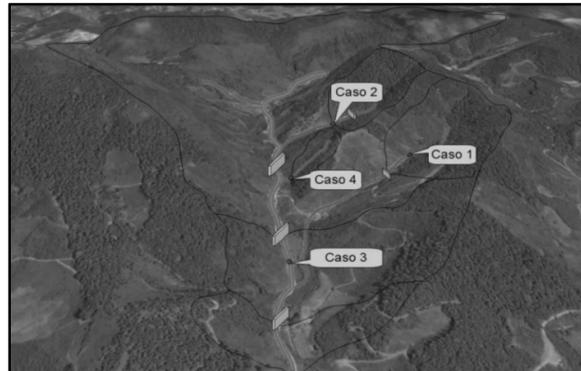


Figura 3. Bacia hidrográfica representando os tipos de caso, para cálculo de vazões pelo Método da Interpolação Linear.

Método da interpolação linear modificado

No MILM (Novaes et al., 2007) considera-se que as vazões são mais dependentes das precipitações do que das áreas de drenagem, resultando na modificação do método original. Tal modificação consistiu em inserir a variável precipitação média, considerando-se, assim, que a vazão na seção de interesse é também proporcional à precipitação média anual. Desta forma, as equações 5 e 6 passaram a ser expressas pelas equações 7 e 8, respectivamente.

$$Q_z = \left(\frac{Q_{m,j}}{P_{m,j} A_{m,j}} \right) (A_z P_z) \quad (7)$$

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z P_z - A_m P_m}{A_j P_j - A_m P_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (8)$$

em que, $P_{m,j}$: precipitação média anual na área de drenagem do posto à montante ou à jusante, mm; P_z : precipitação média anual na área de drenagem da seção de interesse, mm; P_m : precipitação média anual na área de drenagem do posto à montante, mm; e P_j : precipitação média anual na área de drenagem do posto à jusante, mm.

Métodos de Chaves et al. (2002)

O MC considera os mesmos quatro casos distintos do MIL para estimar vazões em diferentes situações da bacia (Figura 3). Para os casos 1 e 2, a vazão de interesse também foi calculada pela Equação 5, enquanto que para os casos 3 e 4, utilizou-se a Equação 9.

$$Q_z = A_z \left[\left(P_m \frac{Q_m}{A_m} \right) + \left(P_j \frac{Q_j}{A_j} \right) \right] \quad (9)$$

$$P_m = \left(\frac{d_j}{d_m + d_j} \right) \quad (10)$$

$$P_j = \left(\frac{d_m}{d_m + d_j} \right) \quad (11)$$

em que, p_m : peso relativo à estação de montante, adimensional; p_j : peso relativo à estação de jusante, adimensional; d_m : distância, medida ao longo do canal, entre o posto de montante e a seção de interesse, km; e d_j : distância, medida ao longo do canal, entre o posto de jusante e a seção de interesse, km.

Métodos de Chaves et al. (2002) Modificado

De modo semelhante ao MILM, no MCM (Novaes et al., 2007) preconiza-se a inserção da precipitação média, sendo a vazão, obtida na seção de interesse, proporcional ao total precipitado nas áreas analisadas. Desta forma, as equações 5 e 9 utilizadas no Método de Chaves et al. (2002) foram substituídas pelas equações 7 e 12, respectivamente.

$$Q_z = (A_z P_z) \left[\left(P_m \frac{Q_m}{A_m P_m} \right) + \left(P_j \frac{Q_j}{A_m P_m} \right) \right] \quad (12)$$

Tabela 2. No presente trabalho, todos os índices estatísticos são considerados como adequados, pois os

Estatísticas de avaliação dos métodos de regionalização

Para cada um dos métodos, a partir das vazões de referência reais e estimadas, foram calculados os erros relativos médios (Equação 1) e coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 2) (Nash and Sutcliffe, 1970) pertinentes a cada método avaliado.

$$ERM = \frac{\sum \left(\frac{|Q_o - Q_e|}{Q_o} \right)}{n} 100 \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_e)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

em que, ERM: erro relativo médio, %; Q_o : vazão observada, $m^3 s^{-1}$; Q_e : vazão estimada, $m^3 s^{-1}$; n: número de estações fluviométricas, adimensional; NS: coeficiente de Nash-Sutcliffe, adimensional e, \bar{Q}_o : média das vazões observadas, $m^3 s^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Equações de regionalização pelo método tradicional

Na identificação das regiões hidrologicamente homogêneas, de acordo com o primeiro critério, o coeficiente angular da reta de regressão com as vazões adimensionalizadas devem ser semelhantes para todas as estações em uma mesma região homogênea (Euclides et al., 1999). Estes variaram entre 0,20 e 0,25 para todas as estações fluviométricas, exceto para a Fazenda Cacheta, na qual o valor foi 0,57. De acordo com o segundo critério, para haver região homogênea, os valores dos resíduos padronizados precisam estar entre -1,5 e 1,5 (Euclides et al., 1999), o que ocorreu para a BHRI. Todavia, como o primeiro critério não foi satisfeito, pode-se inferir que não existe homogeneidade entre esta estação e as demais consideradas no estudo. Desta forma, a referida estação, por ser apenas uma e estar situada isolada no Rio Muqui do Norte, um afluente do rio Itapemirim ao sul da bacia e próximo à foz, foi excluída das análises posteriores.

As equações ajustadas para estimar as vazões pelo Método Tradicional, na BHRI, se encontram na

coeficientes de determinação (R^2) aproximaram-se da unidade (valor máximo), além dos REQm (raiz quadrada do

erro quadrático médio) e dos EPE (erro padrão de estimativa) serem baixos.

Observando-se as três equações pertinentes a cada vazão, verifica-se que os valores dos R², dos REQM e dos EPE apresentaram pouca variação. Desta forma, em comparação com a utilização da variável explicativa A_d, a utilização da P_{eq} e da P_{eq750} não promoveu melhoria expressiva no ajuste estatístico das equações. Isso não significa que a utilização da P_{eq} e da P_{eq750} não sejam recomendadas.

Trabalhos em diferentes bacias (Pruski et al., 2016, 2015, 2013, 2012) mostram que equações de regionalização condicionadas exclusivamente à A_d podem não refletir o

Tabela 2) comparadas com os outros quatro métodos foram aquelas que se utilizam da P_{eq750} como variável explicativa.

Tabela 2. Equações selecionadas para regionalizar vazões de referência (mínimas e médias) na bacia hidrográfica do rio Itapemirim, com respectivas estatísticas de avaliação (coeficiente de determinação R², erro padrão de estimativa – EPE, e raiz quadrada do erro quadrático médio – REQM).

Vazão (m ³ s ⁻¹)	Equação	R ² (adim.)	EPE (m ³ s ⁻¹)	REQM (m ³ s ⁻¹)
Q _{7,10}	$Q_{7,10} = 0,00689 A_d^{0,908811}$	0,971	0,86	0,77
	$Q_{7,10} = 0,106304 P_{eq}^{0,925045}$	0,974	0,81	0,73
	$Q_{7,10} = 0,195977 P_{eq750}^{0,944343}$	0,976	0,79	0,70
Q ₉₀	$Q_{90} = 0,011713 A_d^{0,904169}$	0,986	0,97	0,87
	$Q_{90} = 0,178727 P_{eq}^{0,919649}$	0,987	0,93	0,83
	$Q_{90} = 0,329383 P_{eq750}^{0,937944}$	0,987	0,95	0,85
Q _{mld}	$Q_{mld} = 0,029495 A_d^{0,935552}$	0,988	2,99	2,67
	$Q_{mld} = 0,493896 P_{eq}^{0,951871}$	0,988	2,91	2,60
	$Q_{mld} = 0,927841 P_{eq750}^{0,971292}$	0,988	3,05	2,72

Desempenho dos métodos para estimar as vazões mínimas e médias

Na Tabela 3 são apresentadas, para cada estação fluviométrica, as vazões de referência reais e estimadas por cada método avaliado, associados aos respectivos erros relativos individuais na estimativa (ER). Os valores das vazões são bastante semelhantes aos encontrados em outros trabalhos também conduzidos na BHRI (Eugênio et al., 2013; Gasparini, 2014; Mendes, 2016; Reis et al., 2013), os quais utilizaram outros anos como período base para seu cálculo. No MT, não ocorreu uma tendência de que os erros maiores ou menores se concentrassem em regiões específicas da hidrografia. Os maiores ER pertinentes às vazões mínimas (Q_{7,10} e Q₉₀) estiveram associados à estação Castelo; enquanto para as vazões médias, os maiores ER se concentraram em Ibitirama e Usina Fortaleza. Nos métodos alternativos (MIL, MILM, MC e MCM), as vazões mínimas foram estimadas de forma menos precisa nas estações

efeito da variação das precipitações ao longo da bacia, implicando em superestimava das vazões estimadas nas áreas de drenagem situadas mais à montante, isto é, nas de menor tamanho. O fato da maioria das estações fluviométricas estar localizada em seções da hidrografia com grandes áreas de drenagem, compromete a estimativa das vazões em áreas menores, e o uso da P_{eq} e, especialmente da P_{eq750}, tende a minimizar o risco de extrapolação associado à estimativa advinda das equações de regionalização de vazões (Pruski et al., 2012).

Do exposto, no restante deste trabalho, as equações de regionalização (

associadas aos rios Braço Norte Direito e Rio Braço Norte Esquerdo, em especial Ibitirama, Itaici e Usina Fortaleza.

Tabela 3. Vazões mínimas e médias de referência reais e estimadas pelas cinco metodologias avaliadas, associadas aos respectivos erros relativos de estimação, na bacia do rio Itapemirim.

Estação	Vazão (m ³ s ⁻¹)						Erro relativo (%)				
	Real	MT	MIL	MILM	MC	MCM	MT	MIL	MILM	MC	MCM
Q_{7,10}											
Castelo	2,1	3,5	3,0	2,9	2,9	2,8	64,7	43,6	38,6	38,6	35,2
Fazenda Laginha	1,1	1,5	0,9	0,9	0,9	0,9	40,3	14,7	16,6	14,7	16,6
Ibitirama	1,6	1,5	2,7	2,7	2,8	2,7	6,7	69,1	70,0	74,9	72,8
Itaici	3,9	3,5	2,3	2,2	2,2	2,2	9,2	41,2	42,1	42,6	43,0
Iúna	1,9	1,4	2,0	2,0	2,0	2,0	23,0	9,2	6,5	9,2	6,5
Rive	9,2	8,1	7,3	7,7	7,8	8,3	12,6	20,6	16,7	14,9	9,7
Terra Corrida Montante	2,8	2,0	2,5	2,6	2,5	2,6	26,9	8,4	6,1	8,4	6,1
Usina Fortaleza	0,8	0,7	1,3	1,2	1,2	1,2	13,8	67,2	63,3	57,9	52,2
Usina Paineiras	16,0	16,2	21,5	20,4	21,5	20,4	1,2	34,2	27,5	34,2	27,5
Usina São Miguel	4,7	5,5	6,1	6,1	6,1	6,1	17,0	28,0	29,5	28,0	29,5
Q₉₀											
Castelo	4,4	5,7	5,1	4,9	5,0	4,9	31,1	16,2	12,6	15,3	12,9
Fazenda Laginha	2,2	2,6	1,9	1,9	1,9	1,9	17,9	10,4	12,5	10,4	12,5
Ibitirama	2,9	2,4	4,2	4,3	4,3	4,2	16,6	44,6	45,5	46,6	45,0
Itaici	6,3	5,8	3,8	3,7	3,5	3,5	8,7	40,2	41,1	44,2	44,6
Iúna	3,5	2,4	3,0	2,9	3,0	2,9	30,8	12,6	14,8	12,6	14,8
Rive	14,1	13,2	12,0	12,6	12,9	13,7	6,5	14,7	10,4	8,7	3,2
Terra Corrida Montante	4,1	3,3	4,7	4,8	4,7	4,8	18,1	14,4	17,4	14,4	17,4
Usina Fortaleza	1,4	1,1	1,9	1,9	1,9	1,8	20,3	39,7	35,8	35,1	30,2
Usina Paineiras	26,4	26,4	32,9	31,2	32,9	31,2	0,0	24,5	18,3	24,5	18,3
Usina São Miguel	7,6	9,1	9,3	9,4	9,3	9,4	19,0	21,4	22,8	21,4	22,8
Q_{md}											
Castelo	15,5	17,8	15,8	15,4	16,1	15,8	14,7	2,1	0,8	3,7	1,7
Fazenda Laginha	7,6	7,8	6,9	6,8	6,9	6,8	1,6	9,2	11,3	9,2	11,3
Ibitirama	12,5	7,4	13,2	13,3	13,3	13,2	40,9	5,2	5,9	6,5	5,3
Itaici	19,7	18,0	13,8	13,6	11,9	11,8	8,7	30,1	31,1	39,8	40,4
Iúna	8,9	7,2	8,1	7,9	8,1	7,9	18,6	8,5	10,8	8,5	10,8
Rive	43,7	42,4	39,0	41,0	40,7	43,2	3,1	10,8	6,2	6,9	1,2
Terra Corrida Montante	11,0	10,2	12,0	12,3	12,0	12,3	6,9	9,3	12,1	9,3	12,1
Usina Fortaleza	4,8	3,2	5,3	5,1	5,3	5,1	32,7	11,4	7,3	11,6	7,5
Usina Paineiras	87,5	86,9	101,9	96,8	101,9	96,8	0,7	16,5	10,6	16,5	10,6
Usina São Miguel	23,2	28,8	28,8	29,1	28,8	29,1	24,4	24,1	25,5	24,1	25,5

MT – Método Tradicional; MIL – Método da Interpolação Linear; MILM – Método da Interpolação Linear Modificado; MC – Método de Chaves; MCM – Método de Chaves Modificado

Na

Figura 4 são apresentados os ERM e NS pertinentes à estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{mld} realizadas quando da aplicação de cada um dos cinco métodos avaliados. De maneira geral, observa-se que os ERM são maiores para a $Q_{7,10}$ e menores para a Q_{mld} , independentemente do método de regionalização. Isto deve-se ao fato de que os valores de erro percentual tendem a ser majorados caso a magnitude de vazão real sejam pequenas (Novaes et al., 2007), o que ocorre com as vazões mínimas. Observa-se também, para todos os métodos, tendência à ocorrência de melhores NS para as vazões maiores (Q_{mld}). Assim, pode-se inferir que o desempenho dos cinco métodos de regionalização foi melhor para a Q_{mld} , seguido da Q_{90} e da $Q_{7,10}$.

Os valores do ERM variaram entre 12,1% e 33,6%, sendo semelhantes e até mesmo inferiores aos obtidos em outros trabalhos que avaliaram métodos de regionalização de vazões: entre 13,2% e 100,7% (Novaes et al., 2007; Ribeiro et al., 2005; Silva et al., 2009). Os valores de NS (entre 0,80 e 0,99) se enquadraram na mesma faixa de variação encontrada em trabalhos semelhantes para as bacias do rio Doce (Ribeiro et al., 2005) e do rio São Francisco, à montante da represa de Três Marias (Silva et al., 2009). Tais valores (NS > 0,75) podem ser considerados como indicativos de bom desempenho (Moriassi et al., 2007).

Comparando-se exclusivamente o MIL e o MC com suas versões modificadas (MILM e MCM), observa-se uma melhora nos índices estatísticos, ou seja, uma melhora

no desempenho devido à inserção da variável precipitação. Este melhor desempenho foi mais pronunciado na regionalização da $Q_{7,10}$. Todavia, para estes métodos alternativos ao MT, e assim como verificado em outros trabalhos (Novaes et al., 2007), tal melhoria foi pouco expressiva, o que não justificaria sua adoção pelo fato de necessitar de mais dados de entrada.

Ainda com relação à

Figura 4, verificasse que o MT se mostrou o melhor método para regionalização das vazões mínimas ($Q_{7,10}$ e Q_{90}), por apresentar os menores ERM e os maiores NS. Da mesma forma, em pesquisas semelhantes na bacia do rio Doce (Ribeiro et al., 2005) e na bacia do rio São Francisco à montante do reservatório de Três Marias (Silva et al., 2009), evidenciou-se superioridade do MT em relação ao MIL, e ao MC, para estimar as vazões mínimas. Por outro lado, na bacia do rio Paracatu, afluente mineiro do rio São Francisco (Novaes et al., 2007), as diferenças do ERM entre os mesmos cinco métodos não foram expressivas para estimar as vazões mínimas. Todos os ERM evidenciados no presente trabalho foram menores que os apresentados nos três trabalhos citados.

Para estimar a Q_{mld} , verifica-se similaridade dos ERM (entre 12,1 e 15,2%) e dos NS (entre 0,94 e 0,99) relativos aos cinco métodos. Os valores de NS e ERM indicam que todos os métodos são bons para estimar a Q_{mld} , não havendo diferenças expressivas entre estes. A mesma indicação foi feita para a bacia do rio Paracatu (Novaes et al., 2007).

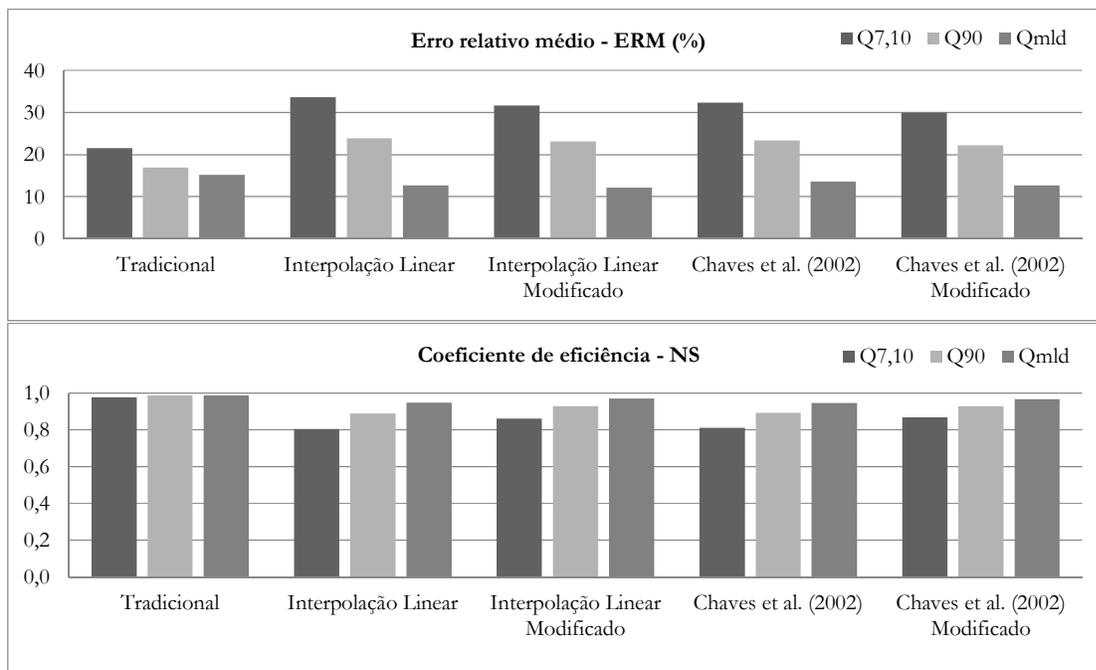


Figura 4. Erros relativos médios (ERM) e coeficientes de eficiência (NS) pertinentes a cada método avaliado para estimar as vazões mínimas e médias de referência na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

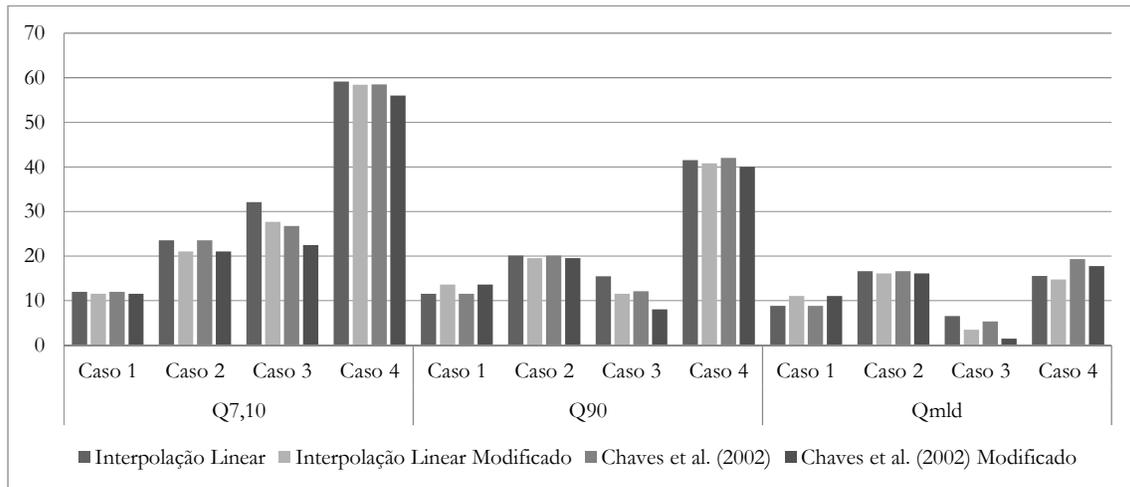


Figura 5. Erros relativos médios (%) pertinentes a cada caso específico de localização das estações fluviométricas, para aplicação dos métodos de regionalização das vazões mínimas e médias de referência na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Na Figura 5, observa-se que para os métodos de regionalização alternativos ao MT, os erros relativos médios mais expressivos ocorreram para as estações fluviométricas enquadradas no caso 4, ou seja, aquelas que se situam em um trecho de rio afluente, cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um rio de ordem superior. O mesmo comportamento foi visto nos resultados apresentados por Silva et al. (2009). Também se observa tendência de menores erros relativos médios para as estações enquadradas no caso 1, em que a vazão é estimada a partir do conhecimento das vazões de jusante. O caso 1 sempre apresentou melhores estimativas que o caso 2, o qual utiliza a mesma equação, mas considera os dados de uma estação de montante. Para as vazões médias, o caso 3, no qual a seção em que se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazão conhecida, mostrou melhor desempenho.

Espera-se que as informações obtidas neste estudo possam auxiliar o governo estadual na gestão sustentável dos recursos hídricos desta bacia hidrográfica, embasado nos instrumentos legais, como na Instrução Normativa n° 19 do IEMA, de 04 de outubro de 2005, sobre a concessão de outorga aos múltiplos usuários da região, podendo utilizar as equações de Q_{90} avaliadas neste estudo.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir, para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, que:

- No Método Tradicional não houve diferença expressiva nas equações de regionalização que utilizaram como variável explicativa a A_d , a P_{eq} ou a P_{eq750} .
- O Método Tradicional apresentou melhor desempenho para a regionalização das vazões mínimas ($Q_{7,10}$ e Q_{90}).

- Não houve diferença expressiva no desempenho dos cinco métodos de regionalização das vazões médias (Q_{mld}).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016. Sistema de Informação Hidrológicas - Hidroweb [WWW Document]. URL www.hidroweb.ana.gov.br (accessed 2.3.16).
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L. DE M., SPAROVEK, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANDRADE, E.M., PORTO, M.M., COSTA, R.N.T., MEIRELES, M., NETO, J.A.C., 2004. Regionalização de modelos de vazões médias de longo período para o Estado do Ceará. *Rev. Ciência Agronômica* 35, 139–148.
- ARAI, F.K., PEREIRA, S.B.S.B., GONÇALVES, G.G.G., 2012. Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Eng. Agrícola* 32, 591–601. doi:10.1590/S0100-69162012000300018
- BAENA, L.G.N., SILVA, D.D. DA, PRUSKI, F.F., CALIJURI, M.L., 2004. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. *Eng. Agrícola* 24, 612–624. doi:10.1590/S0100-69162004000300013
- BARBOSA, S.E. DA S., BARBOSA JÚNIOR, A.R., SILVA, G.Q. DA, CAMPOS, E.N.B., RODRIGUES, V. DE C., 2005. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais. *Eng. Sanitária e Ambient.* 10, 64–71.

- BESKOW, S., MELLO, C.R. de, FARIA, L.C., SIMÕES, M.C., CALDEIRA, T.L., NUNES, G.S., 2014. Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 18, 748–754.
- BESKOW, S., TIMM, L.C., TAVARES, V.E.Q., CALDEIRA, T.L., AQUINO, L.S., 2016. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. *Hydrol. Sci. J.* 61, 2567–2578. doi:10.1080/02626667.2015.1133912
- CHAVES, H.M.L., ROSA, J.W.C., VADAS, R.G., OLIVEIRA, R.V.T., 2002. Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 7, 43–51.
- ELETROBRAS, 1985a. Metodologia para Regionalização de Vazões. Rio de Janeiro.
- ELETROBRAS, 1985b. Manual de Mini Centrais Hidrelétricas. Rio de Janeiro.
- EUCLYDES, H.P., RUBERT, O.A.V., FERREIRA, P.A., SANTOS, R.M. dos, 2001. Regionalização Hidrológica na Bacia do Alto São Francisco à Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 6, 81–105. doi:10.21168/rbrh.v6n2.p81-105
- EUCLYDES, H.P., SOUSA, E.F., FERREIRA, P.A., RUBERT, O.A.V., SANTOS, W.L., 1999. RH3.0 Regionalização Hidrológica: manual do programa. MMA / Ruralminas, Brasília.
- EUGÊNIO, F.C., SANTOS, A.R. dos, DALFI, R.L., MOREIRA, T.R., 2013. Influência do Desmatamento na Disponibilidade Hídrica da Bacia Hidrográfica de Rive, Alegre, ES, Brasil. *Silva Lusit.* 21, 205–218.
- GASPARINI, K.A.C., 2014. Regionalização de vazões para a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim, ES. Universidade Federal do Espírito Santo.
- GUEDES, R.B., HORA, M. de A.G.M. da, 2016. Estudo de regionalização de vazões características e da disponibilidade hídrica na bacia do Alto Tocantins. *Ambiência* 12, 869–879. doi:10.5935/ambiencia.2016.Especial.12
- LAAHA, G., BLÖSCHL, G., 2006. A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *J. Hydrol.* 323, 193–214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.09.001
- LIMA, J.S. de S., SILVA, S. de A., OLIVEIRA, R.B. de, CECÍLIO, R.A., XAVIER, A.C., 2008. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre – ES. *Rev. Ciência Agronômica* 39, 327–332.
- LOPES, T.R., PRADO, G. do, ZOLIN, C.A., PAULINO, J., ANTONIEL, L.S., 2016. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí. *Irriga* 21, 188–201.
- LOPES, T.R., ZOLIN, C.A., PRADO, G. do, PAULINO, J., ALMEIDA, F.T. de, LOPES, T.R., 2017. Regionalization of maximum and minimum flow in the Teles Pires Basin, Brazil. *Eng. Agrícola* 37, 54–63. doi:10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n1p54-63/2017
- MENDES, N.G. de S., 2016. Estudo das vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim. Universidade Federal do Espírito Santo.
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G.J.G., VAN LIEW, M.W.M.W., BINGER, R.L., HARMEL, R.D.D., VEITH, T.L.T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900. doi:10.13031/2013.23153
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- NOVAES, L.F. de, PRUSKI, F.F., QUEIROZ, D.O. de, RODRIGUEZ, R. del G., SILVA, D.D. da, RAMOS, M.M., 2009. Modelo para a Quantificação da Disponibilidade Hídrica: Parte 1. Obtenção da Equação de Recessão. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 14, 15–26. doi:10.21168/rbrh.v14n1.p15-26
- NOVAES, L.F. de, PRUSKI, F.F., QUEIROZ, D.O. de, RODRIGUEZ, R.D.G., SILVA, D.D. da, RAMOS, M.M., 2007. Avaliação do Desempenho de Cinco Metodologias de Regionalização de Vazões. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 12, 51–61. doi:10.21168/rbrh.v12n2.p51-61
- PRUSKI, F.F., NUNES, A. de 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. *J. Hydrol.* 476, 52–71. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.10.005
- PRUSKI, F.F., NUNES, A. de A., REGO, F.S., SOUZA, M.F. de, 2012. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. *Water Resour. Irrig. Manag.* 1, 51–59.
- PRUSKI, F.F., RODRIGUEZ, R. del G., PRUSKI, P.L., NUNES, A. de A., REGO, F.S., 2016. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. *Eng. Agrícola* 36, 830–838. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p830-838/2016
- PRUSKI, F.F., RODRIGUEZ, R.D.G., NUNES, A.A., PRUSKI, P.L., SINGH, V.P., 2015. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. *Eng. Agrícola* 35, 808–816. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p808-816/2015
- REIS, J.A.T. dos, CAIADO, M.A.C., BARBOSA, J.F., MOSCON, M., MENDONÇA, A.S.F., 2013. Análise regional de vazão mínima de referência na Região Centro-

Sul do Estado do Espírito Santo. Rev. CIATEC-UPF 5, 1–11. doi:10.5335/ciatec.v5i2.3161

RIBEIRO, C.B. de M., MARQUES, F. de A., SILVA, D.D. da, 2005. Estimativa e Regionalização de Vazões Mínimas de Referência Para a Bacia do Rio Doce. Eng. na Agric. 13, 103–117.

SAMUEL, J., COULIBALY, P., METCALFE, R.A., 2011. Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods. J. Hydrol. Eng. 16, 447–459. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000338

SILVA, D.D. da, MARQUES, F. de A., LEMOS, A.F., 2009. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do rio São Francisco. Eng. na Agric. 17, 329–403.

SILVA JÚNIOR, O.B., BUENO, E. de O., TUCCI, C.E.M., CASTRO, N.M.R., 2003. Extrapolação Espacial na

Regionalização da Vazão. Rev. Bras. Recur. Hídricos 8, 21–37.

SMAKHTIN, V., 2001. Low flow hydrology: a review. J. Hydrol. 240, 147–186. doi:10.1016/S0022-1694(00)00340-1

SOUSA, H.T. de, PRUSKI, F.F., BOF, L.H.N., CECON, P.R., SOUZA, J.R. de C., 2009. SisCAH 1.0 - Sistema computacional para análises hidrológicas.

TUCCI, C.E.M., 2002. Regionalização de vazões. Editora da Universidade, Porto Alegre.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008. Guide to Hydrological Practices: Hydrology from Measurement to hydrological information (WMO-No. 168). World Meteorological Organization, Geneva.

