

Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos

Fernando Falco Pruski¹, Aline de Araújo Nunes¹,
Fernando Silva Rego¹ & Marlon Fernandes de Souza¹

Protocol 08.2012 - Received: September 27, 2012 - Accepted: October 30, 2012

Resumo: A regionalização de vazões constitui importante ferramenta para se estimar as vazões ao longo da hidrografia; entretanto, a extrapolção das equações de regionalização não é recomendada para além dos limites dos dados amostrais. Este artigo tem por objetivo apresentar alternativas para minimizar os riscos associados à extrapolção das equações de regionalização das vazões mínimas. O estudo foi realizado para a bacia do Rio Pará. Foi avaliado o desempenho de três variáveis explicativas para a regionalização da $Q_{7,10}$. A característica física da bacia utilizada foi a área de drenagem. As variáveis climáticas utilizadas foram a precipitação convertida na vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}) e a precipitação menos um fator de abstração correspondente a 750 mm (P_{eq750}). Foi apresentada, também, imposição de um valor limite de vazão mínima específica para impor uma restrição às vazões mínimas em regiões de extrapolção. A substituição da área pela P_{eq} como variável explicativa e desta pela P_{eq750} promoveu diferenças expressivas tanto nas estatísticas das equações de ajuste como no comportamento da $Q_{7,10}$. 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 nos quais o uso dessas equações não é recomendado.

Palavras-chave: disponibilidade hídrica, gestão de recursos hídricos, segurança hídrica

Extrapolation of equations in low flow regionalization: Alternatives to mitigate the risks

Abstract: Streamflow regionalization is an important tool for estimating the streamflows along the hydrography, however, extrapolation of regionalization equations is not recommended beyond the limits of the sample data. This study aimed to present alternatives to minimize risks associated with the extrapolation of regionalization equations for low flows. The study was conducted for Pará river basin. The performance of new explanatory variables was evaluated for $Q_{7,10}$ regionalization. The physical characteristic used was the drainage area. The climatic variables considered were the rainfall converted into the equivalent streamflow (P_{eq}) and 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_{eq} to replace area as explanatory variable, and P_{eq750} instead of this one, promoted significant differences in statistics of adjustment equations and as well as in behavior of $Q_{7,10}$. 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.

Key words: water availability, management of water resources, water safety

Introdução

A água é um componente sumamente importante em quase todos os setores da atividade humana. O planejamento e a gestão dos recursos hídricos surgiram com o intuito de diminuir os conflitos pelo uso da água, ocasionados pelo rápido crescimento populacional e da crescente expectativa de melhor qualidade de vida (Matondo, 2002).

A disponibilidade dos recursos hídricos é representada pelas vazões médias e mínimas, sendo seu conhecimento imprescindível para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos (Novaes et al., 2009). A vazão média permite caracterizar a disponibilidade hídrica potencial de uma bacia (Pruski & Pruski, 2011) e as vazões mínimas caracterizam a disponibilidade hídrica natural ao longo da hidrografia (Smakhtin, 2001).

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 compreensão da sua complexidade.

Em uma bacia hidrográfica, o balanço hídrico 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 se infiltra no solo e outra parte pode ser retida em depressões da superfície do terreno (Santos et al., 2010; Chow et al., 1988). Ao longo do ano uma parcela da precipitação que se infiltrou constituirá o escoamento subterrâneo (Smakhtin, 2001; 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 & Wood, 1983).

A água que escoar sobre a superfície do solo constitui o escoamento superficial que, junto com o escoamento de base, formará os córregos, rios, lagos e reservatórios (Chow et al., 1988). Portanto, enquanto as vazões médias envolvem tanto os processos associados ao escoamento superficial direto como ao escoamento subterrâneo,

as vazões mínimas estão associadas diretamente ao escoamento subterrâneo.

Quanto maiores a evapotranspiração da cultura, a rugosidade da superfície do solo e a porcentagem de cobertura vegetal, maior também será a taxa de infiltração da água no solo e, sem dúvida, menor será o escoamento superficial (Spohr et al., 2009). O escoamento produzido em uma bacia hidrográfica depende da variabilidade temporal e espacial das chuvas que nela ocorrem (Winchell et al., 1998).

Em um estudo realizado na bacia do São Francisco (Brasil), Pereira et al. (2007) observaram que em algumas sub-bacias, como a do Rio Pandeiros, que possui precipitação média anual da ordem de 1.100 mm, apenas cerca de 17% do volume precipitado são convertidos em escoamento em sua foz. Na sub-bacia do Rio Verde Grande essa baixa conversão é ainda mais evidente visto que, com uma precipitação média anual da ordem de 850 mm, apenas cerca de 4% desse volume se transformam em escoamento na seção em que deságua no Rio São Francisco. Já na bacia do Paracatu, com precipitação média anual de cerca de 1.300 mm, o coeficiente de escoamento é da ordem de 28%. Novaes (2005) estimou que, caso a precipitação ocorrida nos sete meses mais chuvosos na bacia do Paracatu fosse inferior a 750 mm, não haveria água suficiente para garantir sua disponibilidade para a recarga do lençol freático.

Assim, 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.

Para a estimativa das vazões é necessário o conhecimento dos dados históricos, porém, muitas vezes essas informações não estão disponíveis no local de interesse ou não representam corretamente as condições da bacia hidrográfica (Pandey & Nguyen, 1999). Logo, com o intuito de contornar este problema, a regionalização de vazões tem sido frequentemente empregada (Eslamian & Biabanak, 2008; Masih et al., 2010; Mamun et al., 2010; Samuel et al., 2011).

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para suprir a carência de informações hidrológicas em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados (Eslamian & Biabanak, 2008; Rao & Srinivas, 2006; Samuel et al., 2011), sendo definida por Fill (1987) como um processo de transferência de informações de um local para outro. A referida técnica relaciona os processos hidrológicos com características físicas e climáticas de uma bacia.

Os métodos de regionalização utilizados para descrever as relações entre os parâmetros do modelo, as características físicas da bacia e as condições climáticas são variados, mas normalmente relacionam, estatisticamente, os parâmetros do modelo e as características da bacia (Merz & Blöschl, 2004; Wagener et al., 2004; Laaha & Blöschl, 2006). O método da regressão múltipla é uma forma de determinar a magnitude das vazões para um período de retorno e para a transferência de dados de vazão de locais em que há medição para outros, com pequena ou nenhuma disponibilidade de informações (Malekinezhad et al., 2011).

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

Naghattini & Pinto (2007) salientam que, de forma geral, não é recomendada a extrapolação da equação de regressão para além dos limites dos dados amostrais utilizados na estimativa dos parâmetros do modelo de regressão linear. O desestímulo à extrapolação apresenta basicamente dois motivos, em que o primeiro está associado ao fato do intervalo de confiança sobre a linha de regressão alargar à medida em que os valores da variável independente se afastam da média; a outra razão é que a relação entre as variáveis independente e dependente pode não ser linear para valores que extrapolam os dados utilizados na regressão.

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 relativas aos dados disponíveis.

A impossibilidade de estimativa das vazões para áreas de drenagem inferiores à menor área de drenagem dentre as estações fluviométricas consideradas limita a estimativa da disponibilidade hídrica a apenas uma parte inexpressiva da hidrografia limitando o planejamento e a gestão, na maior parte da hidrografia.

Considerando a magnitude 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 visando minimizar os riscos associados à extrapolação das equações de regionalização das vazões mínimas.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado para a bacia do Rio Pará, sub-bacia do Rio São Francisco. Um estudo prévio desenvolvido por Rodriguez (2008) identificou 15 regiões hidrológicamente homogêneas na bacia do São Francisco (Figura 1), sendo a sub-bacia do Pará identificada como região 2.

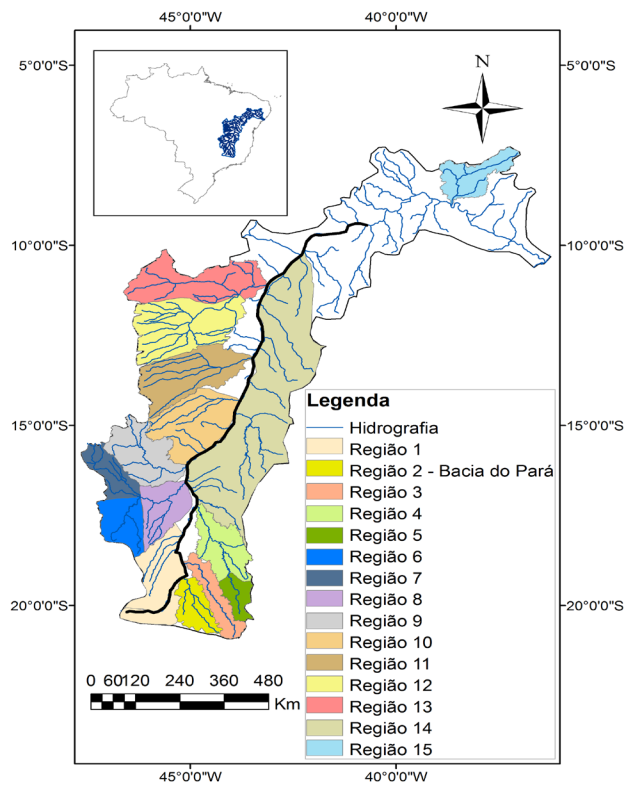


Figura 1. Regiões homogêneas consideradas para a regionalização de vazões na bacia do São Francisco (Rodríguez, 2008)

O Rio Pará, afluente do alto curso do rio São Francisco, está situado no Sudoeste do Estado de Minas Gerais, a área da bacia hidrográfica compreende aproximadamente 12.300 km². Os principais afluentes diretos que formam as maiores sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Pará são os rios: Itapecerica, São João, Lambari, do Peixe e Picão. O clima temperado chuvoso predomina na região, seguido do clima subtropical de altitude, também temperado chuvoso, com verão mais fresco (CBH-Pará, 2007).

Dados utilizados no estudo

No estudo foram utilizados dados de seis estações fluviométricas situadas na bacia do Rio Pará, todas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). As estações fluviométricas utilizadas no estudo estão caracterizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Estações fluviométricas situadas na bacia do Rio Pará, utilizadas no estudo

Estação*	Nome da estação	Latitude	Longitude	Área (km ²)	Curso d'água
40150000	Carmo do Cajuru	-20,18111	-44,79389	2.500	Rio Pará
40170000	Marilândia (Ponte BR-494)	-20,21611	-44,91833	1.040	Rio Itapecirica
40269900	Itaúna - Montante	-20,06639	-44,58139	338	Rio São João
40300001	Jaguaruna - Jusante	-19,74361	-44,81833	1.560	Rio São João
40330000	Velho da Taipa	-19,69389	-44,93083	7.330	Rio Pará
40400000	Álvaro da Silveira	-19,75306	-45,11750	1.820	Rio Lambari

* Código de Rede Hidroweb/ANA

Regionalização de vazões

A relação mais frequentemente utilizada para relacionar a vazão (Q) às características da bacia hidrográfica (A, B,..., M) é uma função potencial (Pandey & Ngueyen, 1999; Merz & Blöschl, 2004, Parajka et al., 2005; Samuel et al., 2011). O modelo de regressão múltipla é expresso por

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

em que:

α - constante de regressão estimada pela análise de regressão.

Portanto, o procedimento empregado na utilização deste método envolve, inicialmente, a definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas e, em uma segunda etapa, na obtenção das equações que permitam associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas.

A variável dependente utilizada na regionalização de vazões na bacia em estudo foi a vazão mínima, com sete dias de duração, associada a um período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$).

A variável climática utilizada na regionalização foi a precipitação média anual. A precipitação que ocorre na área de drenagem de uma bacia hidrográfica é um fator que interfere diretamente no comportamento das vazões, motivo pelo qual a inclusão da precipitação como variável explicativa pode representar uma melhoria expressiva do modelo de regionalização das vazões. Utilizaram-se, neste caso, a precipitação e a área de drenagem como uma única variável, representada pela equação:

$$P_{eq} = \frac{P \times A}{31.536} \quad (2)$$

em que:

P_{eq} - vazão equivalente ao volume precipitado, m³ s⁻¹

P - precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm

A - área de drenagem, km²

Além de permitir uma representação bidimensional da relação entre as variáveis dependentes e

independentes, o uso de uma única variável independente no modelo de regionalização de vazões também permite o ganho de um grau de liberdade na análise estatística.

Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, não reflete efetivamente a contribuição para a formação dessas vazões. Visando à melhor representação dos processos físicos envolvidos na formação das vazões utilizou-se, neste trabalho, o valor de 750 mm (Novaes, 2005) 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.

Para a consideração da variável explicativa correspondente à precipitação menos o fator de abstração da precipitação para a formação das vazões, tal como feito para a precipitação, também se utilizou uma única variável, expressa pela equação:

$$P_{eq750} = \frac{(P - 750) A}{31.536} \quad (3)$$

em que:

P_{eq750} - vazão equivalente ao volume precipitado, considerando-se a subtração do fator de abstração da precipitação para a formação das vazões (considerado, neste trabalho, igual a 750 mm), m³ s⁻¹

Desta forma, as variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem (A), a vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}) 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}).

Obteve-se a área de drenagem à montante de cada seção da hidrografia utilizando-se o Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), gerado a partir de cartas planialtimétricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e de hidrografia mapeada na escala 1:50.000.

As variáveis explicativas associadas à precipitação foram obtidas de séries históricas de pre-

cipitação oriundas de estações pluviométricas existentes na bacia do Pará e nas bacias circunvizinhas 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.

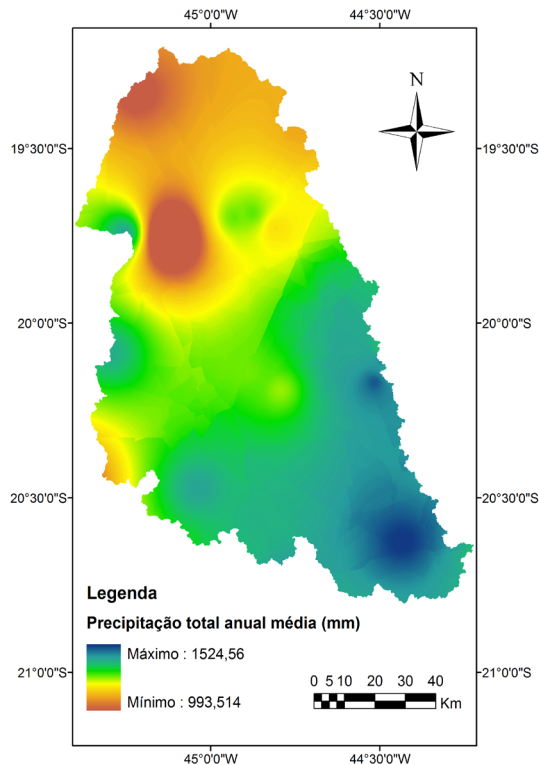


Figura 2. Distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica em estudo

Conforme se verifica na análise do mapa de isoietas da bacia estudada (Figura 2), as maiores precipitações são evidenciadas na parte Sudeste da bacia, onde atingem valores da ordem de 1.520 mm, decrescendo progressivamente no sentido noroeste, em que a magnitude da precipitação média anual cai para valores da ordem de 1.000 mm.

Com vista à aplicação do modelo de regressão múltipla foi utilizado o software Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (Sis-CoRV 1.0) desenvolvido por Sousa (2009).

Na seleção das equações que conduziram ao melhor ajuste estatístico utilizou-se, assim como Laaha & Blöschl (2005), o erro absoluto estima-

do 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 grande amplitude de variação nas regiões nas quais a extrapolação é feita, o que pode conduzir a superestimativas das vazões mínimas e, conseqüentemente, um grande risco de que demandas estabelecidas com base nessas 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 $q_{7,10}$, o maior valor evidenciado nas estações fluviométricas na região hidrologicamente homogênea correspondente.

Desta forma, caso a $q_{7,10}$ estimada no trecho da base hidrográfica pela equação de regionalização fosse maior que o valor limite, a $Q_{7,10}$ passaria a ser estimada pela equação:

$$Q_{7,10_adjust} = q_{7,10} A \quad (4)$$

em que:

$Q_{7,10_ajust}$ - vazão mínima com sete dias de duração, associada a um período de retorno de 10 anos, ajustada com base na $q_{7,10}$ limite, $m^3 s^{-1}$

$q_{7,10_lim}$ - vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização, adimensional

Resultados e Discussão

Na Tabela 2 se apresentam a área de drenagem, a $Q_{7,10}$ e a $q_{7,10}$ para as seis estações fluviométricas consideradas no estudo.

A menor área de drenagem entre as seis estações fluviométricas estudadas é de 338 km^2 e a $q_{7,10}$ varia de 1,92 a 5,41 $L s^{-1} km^{-2}$.

As Eqs. 5 a 7, obtidas nas presentes condições e apresentadas em estudo de regionalização de vazões e geração de modelo para a automatização da obtenção

Tabela 2. Área de drenagem, $Q_{7,10}$, e $q_{7,10}$ específica para as seis estações fluviométricas consideradas no estudo

Estação	Nome da estação	Área (km^2)	$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)	$q_{7,10}$ ($L s^{-1} km^{-2}$)
40150000	Carmo do Cajuru	2.500	12,24	4,90
40170000	Marilândia (Ponte BR-494)	1.040	2,00	1,92
40269900	Itaúna - Montante	338	1,83	5,41
40300001	Jaguaruna - Jusante	1.560	3,98	2,55
40330000	Velho da Taipa	7.330	22,13	3,02
40400000	Estação Alvaro da Silveira	1.820	4,54	2,49

* Código de Rede Hidroweb/ANA

de vazões mínimas (Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$) e média para o estado de Minas Gerais, realizado por GPRH/IGAM (2012), foram as que propiciaram os melhores ajustes para a $Q_{7,10}$ em função das três variáveis independentes consideradas no estudo (A , P_{eq} e P_{eq750}).

$$Q_{7,10} = 0,0066A^{0,8988} \tag{5}$$

$$Q_{7,10} = 0,1006P_{eq}^{0,9153} \tag{6}$$

$$Q_{7,10} = 0,1897P_{eq750}^{0,9305} \tag{7}$$

Na Tabela 3 são apresentados os valores de R^2 , do erro padrão e da amplitude do erro relativo para a $Q_{7,10}$, considerando-se, como variáveis independentes, A , P_{eq} e P_{eq750} .

Tabela 3. Coeficiente de saturação (R^2), erro padrão e amplitude do erro para a $Q_{7,10}$ considerando A , P_{eq} e P_{eq750} como variáveis independentes

	A	P_{eq}	P_{eq750}
R^2	0,842	0,858	0,874
Erro Padrão	0,441	0,418	0,394
Erro Relativo (%)	-38,4 a 71,4	-36,3 a 69,3	-33,8 a 67,4

A utilização da variável explicativa P_{eq} 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, o que também se constata quando da substituição da P_{eq} pela P_{eq750} .

Embora a análise estatística seja uma ferramenta importante na avaliação do comportamento dos processos hidrológicos, o uso de pro-

cedimentos que auxiliem na compreensão dos processos físicos de formação das vazões possibilita uma representação melhor dos dados disponíveis; na Figura 3 se representa a variação da $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia utilizando-se, como variáveis explicativas, A , P_{eq} e P_{eq750} . 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.

A utilização da área de drenagem como variável explicativa produz a obtenção de valores de $q_{7,10}$ que variam de $2,55 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ a $10,30 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, sendo as $q_{7,10}$ obtidas condicionadas exclusivamente a esta variável explicativa não refletem, desta forma, o efeito da variação das precipitações ao longo da bacia. A substituição da área de drenagem como variável explicativa pela P_{eq} traz, como consequência, a redução da amplitude de variação das $q_{7,10}$ para uma faixa de $2,57 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ a $8,55 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, acarretando também nova distribuição espacial das $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia. Esta nova distribuição das vazões específicas passa a refletir também o comportamento das precipitações médias anuais ao longo da bacia (Figura 2).

Grande quantidade de água que circula através da atmosfera não atinge a hidrografia, não sendo efetivamente útil no processo de formação do escoamento. A substituição da P_{eq} pela P_{eq750} , que visa contemplar este processo, torna ainda mais nítido o efeito da variação da precipitação no comportamento das vazões ao longo da hidrografia (Figura 3C), acarretando, também, uma redução

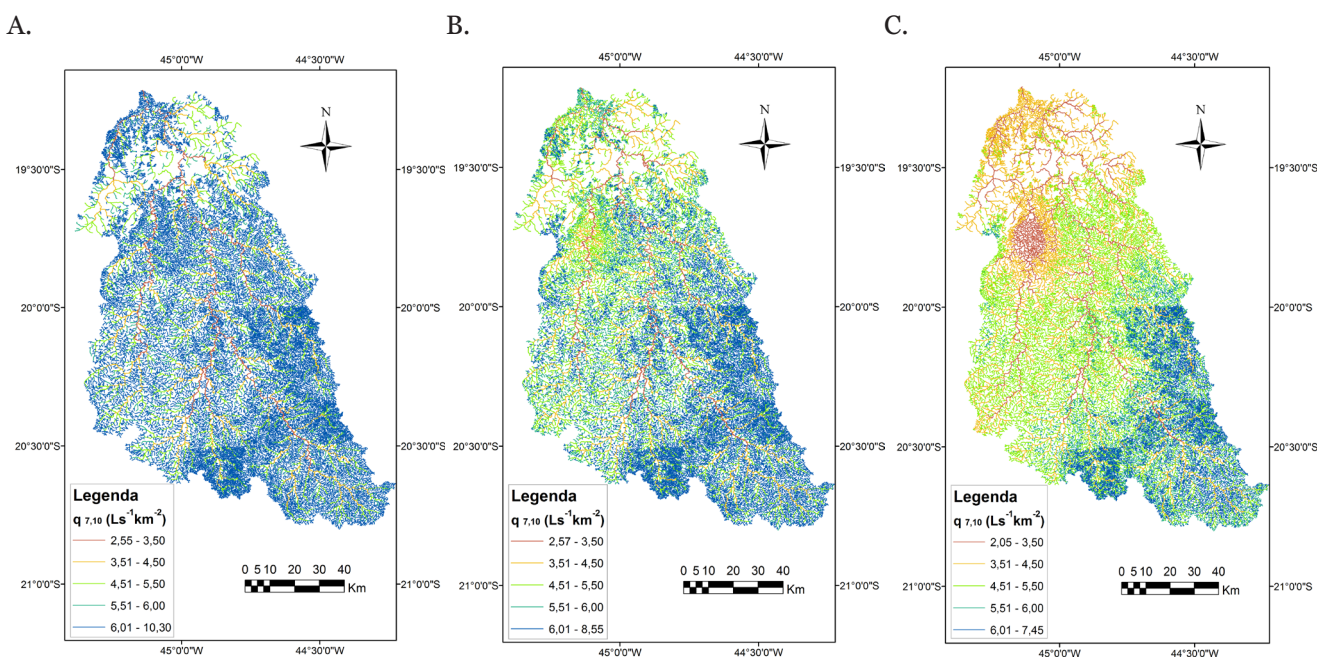


Figura 3. Representação da variação da $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia utilizando como variáveis explicativas a área de drenagem (A) (A), a vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}) (B) e a vazão no curso d'água (P_{eq750}) (C)

ainda maior na amplitude de variação das $q_{7,10}$ ao longo da hidrografia e na própria ordem de grandeza das $q_{7,10}$ estimadas, que passam a variar de 2,05 a 7,45 $L s^{-1} km^{-2}$, comportamento este também evidenciado por Pruski et al. (2012).

A substituição da A pela P_{eq} como variável explicativa e desta pela P_{eq750} , mostrou-se, neste caso, de grande eficiência, tanto no ajuste estatístico como na representação da variação da precipitação ao longo da bacia. O uso da P_{eq750} como variável explicativa também tende a minimizar o risco de extrapolação associado à estimativa advinda das equações de regionalização de vazões.

O fato da maioria das estações fluviométricas estar localizada em seções da hidrografia às quais, por sua vez, estão associadas grandes áreas de drenagem, compromete a estimativa das vazões em áreas menores. Para o planejamento e 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 338 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. A fim de minimizar os riscos associados à extrapolação da equação de regionalização obtida, principalmente em regiões de cabeceira, a $Q_{7,10}$ foi ajustada utilizando-se um valor igual ao da maior $q_{7,10}$ entre as estações fluviométricas; neste caso, igual a 0,005405 $m^3 s^{-1} km^{-2}$. A $Q_{7,10}$ passa a ser ajustada pela equação:

$$Q_{7,10_adjust} = 0,005405A \quad (8)$$

O uso da restrição a um valor máximo de vazão específica impõe, portanto, uma restrição física para a $Q_{7,10}$, reduzindo o risco de superestimar as vazões mínimas em regiões de extrapolação. Considerando os diversos segmentos da hidrografia da bacia do Rio Pará, evidencia-se, para a variável P_{eq750} , que os valores das vazões específicas excedem o limite físico de 5,41 $L s^{-1} km^{-2}$ em 45% dos segmentos da hidrografia considerada (Figura 4).

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 das variáveis A e P_{eq} . Nas Figuras 5A e 5B é possível observar uma porcentagem ainda maior de segmentos da hidrografia que exigem imposição quando do uso dessas variáveis, chegando a 85% quando consi-

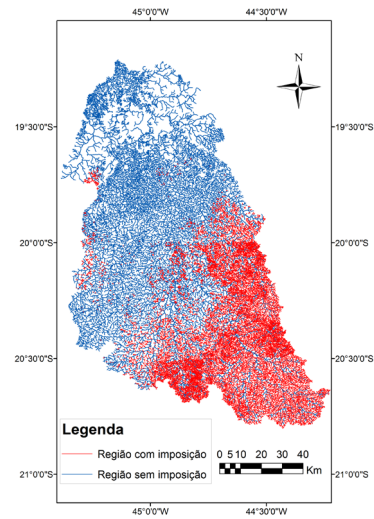
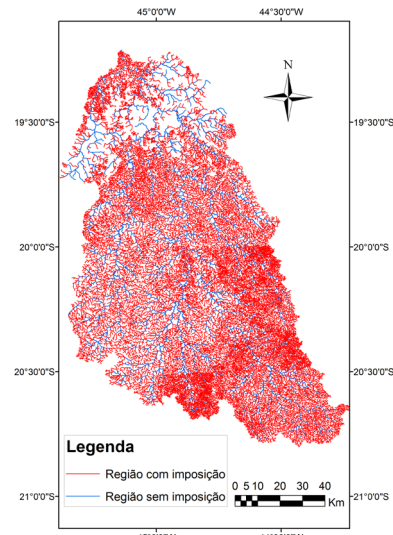


Figura 4. Segmentos da bacia do rio Pará (destacados em vermelho) onde foi necessário o ajuste da $Q_{7,10}$ com base na vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização

A.



B.

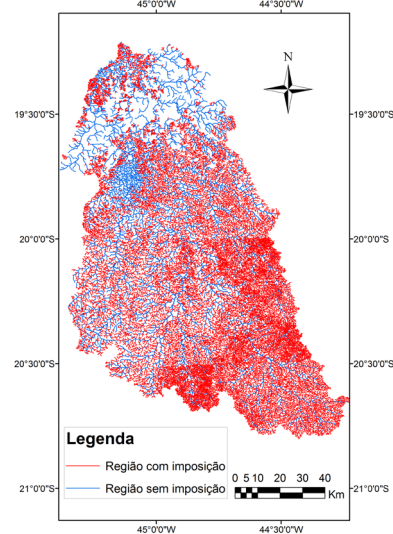


Figura 5. Segmentos da bacia do rio Pará (destacados em vermelho) onde foi necessário o ajuste da $Q_{7,10}$ com base na vazão específica utilizada como limite para a extrapolação da equação de regionalização, considerando como variáveis explicativas a A (a) e a P_{eq} (b)

derada a A como variável explicativa e 72% quando considerada a P_{eq} .

Conclusões

A utilização da variável P_{eq} em substituição à área de drenagem promoveu diferenças expressivas tanto nas estatísticas das equações de ajuste como, principalmente, no comportamento da $Q_{7,10}$. As diferenças foram ainda mais evidentes quando da utilização da P_{eq750} , fazendo com que a distribuição das vazões específicas ao longo da hidrografia passe a apresentar um comportamento físico mais coerente. 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 se estender o emprego das equações de regionalização a trechos da hidrografia cujo uso não é recomendado sem, contudo, comprometer a segurança do suprimento de disponibilidade hídrica e a sustentabilidade ambiental, nessas regiões de imposição.

Literatura Citada

- Beven, K.; Wood, E. F. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, v.65, p.139-158, 1983.
- Brodie, R. S.; Hosteler, S.; Slatter, E. Comparison of daily percentiles of streamflow and rainfall to investigate stream-aquifer connectivity. *Journal of Hydrology*, v.349, p.56-67, 2008.
- CBH-Pará. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará: Etapa 2 - Caracterização do meio físico. Curitiba: TESE, 2007. 95p.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill. 1988. 572p.
- Eslamian, S.; Biabanaki, M. Low flow regionalization modeling. *International Journal of Ecological Economics & Statistics*, 2008. <http://findarticles.com/p/articles/mi_6925/is_12/ai_n28516608/>. 24 Mar. 2010.
- Fill, H. D. Informações hidrológicas. In: Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. Nobel: ABRH. cap.2, 1987. p.93-210.
- GPRH - Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. 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. Low flow estimates from short stream flow records - A comparison of methods. *Journal of Hydrology*, v.306, p.264-286, 2005.
- Laaha, G.; Blöschl, G. A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323, p.193-214, 2006.
- Li, Z.; Liu, W.; Zhang, X.; Zheng, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, v.377, p.35-42, 2009.
- Malekinezhad, H., Nachtnebel, H. P., Klik, A. Comparing the index flood and multiple regression methods using L-moments. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.36, p.54-60, 2011.
- Mamun, A. A.; Hashim, A.; Daoud, J. I. Regionalisation of low flow frequency curves for the Peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*, v.381, p.174-180, 2010.
- Manning, J. C. *Applied principles of hydrology*. 3.ed., Upper Saddle River: Prentice Hall. 1997. 276p.
- Masih, I.; Uhlenbrook, S.; Maskey, S.; Ahmad, M.D. 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*, v.391, p.188-201, 2010.
- Matondo, J.I. A comparison between conventional and integrated water resources planning and management. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.27, p.831-838, 2002.
- Merz, R.; Blöschl, G. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, v.287, p.95-123, 2004.
- Naghetini, M.; Pinto, É. J. de A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.
- Novaes, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Viçosa: UFV. 2005. 104p. Dissertação Mestrado
- Novaes, L.F.; Pruski, F.F.; Queiroz, D.O. de; Rodriguez, R. del G.; Silva, D.D.; Ramos M.M. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica: Parte 1 - Obtenção da equação de recessão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, p.15-26, 2009.
- Pandey, G. R.; Nguyen, V.T.V. A comparative study of regression based methods in regional frequency analysis. *Journal of Hydrology*, v.225, p.92-101, 1999.
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G. A comparison of regionalization methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth System Science*, v.9, p.157-171, 2005.
- Pereira, S. B.; Pruski, F. F.; Silva, D. D.; Ramos, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.615-622, 2007.
- Pruski, F. F.; Nunes, A. A.; Pruski, P. L.; Rodriguez, R. del G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. *Journal of Hydrology*, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.005>
- Pruski, F. F.; Pruski, P. L. Tecnologia e inovação frente a gestão de recurso hídricos. In: Medeiros, S. de S.; Gheyi, H. R.; Galvão, C. de O.; Paz, V. P. da S. (ed.), *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande: INSA, 2011. p.27-58.
- Rao, A. R.; Srinivas, V. V. Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, v.318, p.57-79, 2006.

- Rodriguez, R. del G. Proposta conceitual para a regionalização de vazões. Viçosa: UFV. 2008. 254p. Tese Doutorado
- Samuel, J.; Coulibaly, P.; Metcalfe, R. A. Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: Comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.16, p.447, 2011.
- Santos, E. H. M.; Griebeler, N. P.; Oliveira, L. F. C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.826-834, 2010.
- Silva Júnior, O. B.; Bueno, E. O.; Tucci, C. E. M.; Castro, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização de vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, p.21-37, 2003.
- Smakhtin, V.U. Low flow hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, v.240, p.147-186, 2001.
- Sousa, H. T. Sistema computacional para regionalização de vazões. Viçosa: UFV. 2009. 86p. Dissertação Mestrado
- Spohr, R.B.; Carlesso, R.; Gallárreta, C.G.; Préchac, F.G.; Petillo, M.G. Runoff modeling from soil physical characteristics in different places in Uruguay. *Ciência Rural*, v.39, p.74-81, 2009.
- Tucci, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre: UFRGS. 2002. 256p.
- Wagener, T.; Wheater, H. S.; Gupta, H. V. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. London: Imperial College Press, 2004. 300p.
- Winchell, M.; Gupta, H. V.; Sorooshian, S. On the simulation of infiltration- and saturation-excess runoff using radar-based rainfall estimates: Effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation. *Water Resources Research*, v.34, p.2655-2670, 1998.

