

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS: BREVE REVISÃO TEÓRICA

Regionalization of minimum flows: brief theoretical review

Ana Carla Fernandes Gasques¹, Gabriela Leite Neves², Jordana Dorca dos Santos³,
Frederico Fábio Mauad⁴, Cristhiane Michiko Passos Okawa⁵

Recebido em 10 de julho de 2017; aceito em 10 de outubro de 2017; disponível on-line em 06 de março de 2018.



PALAVRAS CHAVE:

Vazões mínimas;
Metodologias de regionalização;
Variabilidade temporal;
Dados hidrológicos;
Déficit hídrico;

KEYWORDS:

Minimal flow;
Regionalization
Methodologies;
Temporal variability;
Hydrological data;
Hydro deficit.

RESUMO: A ocorrência de fenômenos de déficit hídrico depende da variabilidade temporal da precipitação pluvial e, conseqüentemente, da vazão. Assim, o conhecimento dessa variabilidade se torna necessária para a previsão da quantidade hídrica disponível que pode estar abaixo do volume necessário para determinado uso, sendo fundamental para a gestão dos recursos hídricos. No entanto, os dados necessários para a estimativa de vazões nem sempre estão disponíveis. Diante da ausência desses dados e da dificuldade em prever a variabilidade, utiliza-se da técnica de regionalização, a qual visa transferir as informações hidrológicas de uma região com dados para outra com ausência de dados. Diante disso, o presente artigo teve por objetivo realizar uma revisão teórica acerca da regionalização de vazões mínimas. Para tal, a metodologia, classificada como exploratória, descritiva, bibliográfica e documental, consistiu em análise das produções bibliográficas científicas da área utilizando bases de pesquisa como o Scielo, Scopus, Web of Science, Science Direct além de teses e dissertações. A regionalização de vazões mínimas vem sendo aplicada em diversos estudos e é desenvolvida a partir da análise dos seguintes dados: análise de frequência, curva de duração e curva de depleção. As vazões mínimas indicam a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, sendo assim, conhecê-las é importante para projetos de barragens e usinas hidrelétricas, avaliação de disponibilidade hídrica para irrigação, dentre outros projetos hidrológicos.

ABSTRACT: The occurrence of water deficit phenomena depends on the temporal variability of the pluvial precipitation and, consequently, the flow. Thus, the knowledge of this variability becomes fundamental for management of water resources. However, the data required for flow estimation are not always available. Given the lack of data and the difficulty in predicting variability, the regionalization technique is used to transfer the hydrological information from one region with data to another with no data. Therefore, the aim of this paper was to carry out a theoretical review about the regionalization of minimum flows. For this, the methodology, classified as exploratory, descriptive, bibliographical and documentary, consisted of an analysis of the scientific bibliographic productions of the area using research bases such as Scielo, Scopus, Web of Science, Science Direct as well as theses and dissertations. The regionalization of minimum flows has been applied in several studies and is developed from the analysis of the following data: frequency analysis, duration curve and depletion curve. The minimum flows indicate the water availability of a river basin, so knowing them is important for dam projects and hydroelectric plants, water availability assessment for irrigation, among other hydrological projects.

* Contato com os autores:

¹ e-mail: anacarlafgasques@gmail.com (A. C. F. Gasques)

Eng^a. Ambiental. Especialista em Eng. de Segurança do Trabalho e Mestre em Eng. Urbana, Prof^a. Colaboradora do Dep. de Eng. de Produção (UEM).

² e-mail: gabriela.leiteneves@usp.br (G. L. Neves)

Bióloga. Especialista em Gestão Ambiental e Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

³ e-mail: jordanadorca@gmail.com (J. D. dos Santos)

Eng^a. Ambiental. Especialista em Eng. de Segurança do Trabalho e Mestre em Eng. Química, Prof^a Colaboradora de Eng. de Produção Agroindustrial, (UNESPAR).

⁴ e-mail: mauadffm@sc.usp.br (F. F. Mauad)

Eng. Agrícola, Mestre em Eng. Mecânica - Energia pela Univ. Federal de Itajubá, Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade Estadual de Campinas e Prof. Associado da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (USP).

⁵ e-mail: cmpokawa@uem.br (C. M. P. Okawa)

Eng^a. Civil, Mestre em Eng. Hidráulica e Doutora em Ciências Ambientais, Docente do Departamento de Engenharia Civil, (UEM).

1. INTRODUÇÃO

A água é de extrema importância em todas as atividades desenvolvidas pelo homem. Devido a isso, surge o planejamento e a gestão dos recursos hídricos a fim de reduzir os conflitos envolvendo o uso da água decorrente do crescimento populacional e da melhora na expectativa de vida da população (BARBOSA et al., 2005; MARTINS et al., 2011). Considerando sua importância, em 1997 foi criada a Lei Nacional de Recursos Hídricos, a qual aborda, dentre outros aspectos, a gestão múltipla dos recursos hídricos, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Também trata a água como recurso de domínio público com valor econômico e que, de acordo com a sua disponibilidade, possui níveis de prioridade para seu uso.

A disponibilidade hídrica natural em uma bacia hidrográfica é representada pelas vazões mínimas e seu conhecimento é de fundamental importância para a correta gestão de recursos hídricos (SMAKHTIN, 2001; BARBOSA et al., 2005; MARTINS et al., 2011). Diante disso, um dos maiores desafios em hidrologia consiste em identificar o real comportamento dos processos hidrológicos para análise de vazões tendo em vista que este conhecimento é qualitativo, dificultando seu gerenciamento por meio de bases ambientalmente sustentáveis. Além disso, quantificar tais dados depende da análise de variáveis com comportamento estocástico que descrevem tais processos no decorrer do tempo. O melhor entendimento de uma ou mais dessas variáveis depende das informações observadas neste sistema, porém, nenhum modelo, técnica matemática ou estatística é capaz de criar informações, sendo, então, um auxiliar para explorar melhor as informações existentes (TUCCI, 2002; REGO, 2013; LOPES et al., 2017).

Nesse contexto, tendo por objetivo ter acesso a informações hidrológicas de locais com dados insuficientes ou inexistentes, tem-se destacado estudos envolvendo regionalização de vazões. A regionalização é uma ferramenta que,

por meio de metodologias específicas, vem sendo adotada como forma de suprir a carência de informações hidrológicas a partir da transferência de variáveis, funções ou parâmetros de um local a outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (PRUSKI et al., 2012).

Existem vários métodos de regionalização para analisar as relações entre os parâmetros do modelo, as características físicas da bacia e as condições climáticas, entretanto, normalmente, relacionam os parâmetros do modelo e as características da bacia a partir de cálculos estatísticos. Têm-se quatro situações: 1) variáveis: determina-se a variável de uma região com base em relações nos dados pontuais existentes; 2) funções: através de curvas de intensidade versus curva de frequência ou curva de duração, determina-se a função hidrológica em determinada região; 3) parâmetros: os parâmetros de uma função ou modelo matemático podem ser determinados pela sua relação com as características físicas da bacia através do ajuste do modelo; 4) indicadores regionais: valores médios de variáveis ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma variável ou entendimento do seu comportamento (TUCCI, 2002; PRUSKI et al., 2012; LOPES et al., 2017).

As características fisiográficas e climáticas são consideradas uniformes dentro de uma bacia, o que possibilita aplicação da regionalização, sendo então, adotadas como variáveis explanatórias para as modelagens determinadoras da vazão em questão. A regionalização também permite melhorar a rede de coleta dos dados envolvendo os processos hidrológicos à medida que esta metodologia explora melhor as informações disponíveis e identifica lacunas (TUCCI, 2002; MARTINS et al., 2011; REGO, 2013).

A regionalização do fluxo hidrológicos em alguns casos torna-se de extrema importância, principalmente quando o custo para implantação da rede hidrométrica para medir dados se torna inviável. Além disso, o processo de regionalização melhora as estimativas das variáveis hidrológicas e permite verificar a consistência das séries de dados hidrológicos (LOPES, 2017). Sendo assim,

diante do exposto, este artigo tem por objetivo desenvolver uma revisão teórica acerca da regionalização de vazões mínimas.

2. METODOLOGIA ADOTADA

Esta pesquisa classifica-se quanto aos fins, como exploratória e descritiva, e quanto aos meios, como pesquisa bibliográfica, documental (Lakatos e Marconi, 2005). O presente artigo trás uma revisão bibliográfica e conceitual acerca da regularização de vazões com enfoque nas vazões mínimas, sendo esta uma revisão narrativa em que foram analisadas as produções bibliográficas científicas da área utilizando as bases bibliográficas *Scielo*, *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* além de teses de doutorado e dissertações de mestrado. O período de análise dos trabalhos consultados abrangeu os anos de 2007 a 2017, em que os termos utilizados foram hidrologia, regularização de vazões, vazões mínimas, dados hidrológicos e reservatórios.

O trabalho está estruturado em quatro seções. Primeiramente, a pesquisa é contextualizada e o seu objetivo, apresentado. Em seguida, na segunda seção, é apresentada a metodologia utilizada, posteriormente, na terceira seção são apresentados os conceitos e os trabalhos aplicados envolvendo dados hidrológicos, regularização de vazão e vazões mínimas. Na quarta seção são apresentadas considerações finais e, por fim, as referências utilizadas.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 DADOS FÍSICOS E HIDROLÓGICOS

Para a estimativa das vazões, são necessários dados hidrológicos, e dados que incluem características físicas e climáticas de uma determinada região que interferem na distribuição espacial e temporal das vazões em bacias hidrográficas. Segundo Alves et al. (2014) índices e parâmetros físicos são dados de extrema importância para a caracterização hidrológica das bacias hidrográficas, para identificar fragilidades

naturais, como cheias e enchentes, auxiliar no manejo e planejamento do uso/ocupação dos solos destas unidades, e também nos processos de gerenciamento de recursos hídricos.

A bacia hidrográfica é definida como o conjunto de terras limitadas por divisores de águas contendo um sistema de drenagem composto de nascentes e cursos de água principais e secundários, denominados afluentes e subafluentes que drenam a água para um único ponto denominado exutório (Targa, 2012). Para Alves et al. (2014) a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo seu exutório, levando em consideração, como perdas intermediárias, os volumes evaporados e transpirados e ainda os infiltrados para as camadas mais profundas do solo.

Os principais dados necessários para regionalização de vazões são os dados morfométricos, que representam as características físicas da bacia, levantados através da análise de mapas analógicos, ou de dados de sensoriamento remoto. A análise morfométrica para Antonelli e Thomaz (2007) é uma ferramenta de suma importância para gestão dos recursos hídricos, pois permite prever a suscetibilidade da bacia a fenômenos extremos e permite a diferenciação de áreas homogêneas. Os parâmetros morfométricos podem ser divididos em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem (Quadro 1).

Essas características são denominadas variáveis explicativas, as quais influenciam e explicam o comportamento e a distribuição das vazões. As variáveis explicativas mais utilizadas em estudos de regionalização de vazões são: área de drenagem, comprimento do rio, densidade de drenagem e declividade média do rio principal. Entretanto, a área de drenagem é considerada a principal variável explicativa em diversos estudos de regionalização de vazões, já que possui boa correlação com as outras características físicas da bacia e possui influência na disponibilidade de água ao longo da hidrografia (Razavi e Coulibaly, 2013; Lopes et al, 2016; Oliveira, 2013).

QUADRO 1: Características morfométricas obtidas no estudo da bacia e sub-bacias hidrográficas.	
Características geométricas	
Área total	Fator de Forma (F)
Perímetro total	Índice de Circularidade (IC)
Coefficiente de compacidade (Kc)	Padrão de drenagem
Características do Relevo	
Orientação	Altitude mínima
Declividade mínima	Altitude média
Declividade média	Altitude máxima
Declividade máxima	Declividade média do curso d'água principal
Características da rede de Drenagem	
Comprimento do curso d'água	Densidade de drenagem (Dd)
Comprimento total dos cursos d'água	Ordem dos cursos de água

FONTE: TONELLO, 2006.

Tucci (2002) afirma que a determinação dos parâmetros se dá pela relação das características físicas das bacias. O referido autor apresenta possíveis variáveis explicativas para a variável a ser regionalizada, a saber: Vazão mínima: área da bacia e densidade de drenagem; Vazão média: área da bacia e precipitação; e, Vazão máxima de cheia: área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio.

Alterach et al. (2006) ao avaliarem procedimentos para regionalização de vazões diárias concluíram que, entre os parâmetros empregados, os mais significativos foram: a área de drenagem, a precipitação média anual, o comprimento do rio principal, o relevo da bacia e a percentagem de área impermeável. O clima, entretanto, desempenha um importante papel na representação do comportamento hidrológico pelos modelos matemáticos (YOUNG, 2006). A variável climática mais utilizada em estudos de regionalização de vazões é a precipitação, sendo que para a estimativa das vazões mínimas as precipitações mais utilizadas são: total anual, semestre mais seco e trimestre mais seco (LEMOS, 2006; OLIVEIRA, 2008; RODRIGUEZ, 2008).

A precipitação total anual é mais utilizada tanto para as vazões mínimas quanto vazões médias, pois sua variação reflete diretamente no comportamento das vazões específicas, representando assim uma melhoria do

modelo de regionalização (BAENA et al., 2004; DINPASHOH et al., 2004). Os dados hidrológicos são medidos em locais definidos, com um pluviômetro numa bacia e um posto fluviométrico numa seção de um rio. Em que o primeiro observa a ocorrência da precipitação, como uma amostra pontual de um processo espacial de entrada do sistema, enquanto o segundo observa a integração espacial da saída, representada pelo escoamento na bacia.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas realiza o monitoramento hidro meteorológico em tempo real com cerca de 1.075 estações fluviométricas e 981 pluviométricas distribuídas nas 12 Regiões Hidrográficas Brasileiras. A Rede Hidro meteorológica possui cerca de 283 estações telemétricas visando a obtenção de dados hidrológicos em tempo real (ANA, 2017). Porém, os dados disponibilizados pela ANA através do sistema de informações hidrológicas Hidro Web, apresentam falhas diárias, mensais e anuais, o que pode inviabilizar a utilização dessas séries.

Para Tucci (2002) um dos aspectos que dificultam a obtenção destes dados hidrológicos é que estes equipamentos dificilmente cobrem todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, outro aspecto é a variabilidade das condições geográficas-hidrológicas. Os estudos de aproveitamento de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica defrontam-se, muitas vezes, com o problema da ausência ou insuficiência de dados

que compõem a série histórica de vazões, necessária à avaliação da disponibilidade hídrica superficial (BARBOSA et al., 2005).

A existência de falhas nas séries históricas se deve, basicamente, à ausência do observador, falhas nos mecanismos de registro, perda das anotações ou das transcrições dos registros pelos operadores e encerramento das observações, entretanto, como existe a necessidade de se trabalhar com séries contínuas, essas falhas necessitam ser preenchidas (STRECK et al., 2009; BERTONI e TUCCI, 2007).

Para o preenchimento das falhas nas séries históricas, Leivas et al. (2006) recomendam a seleção das estações meteorológicas da mesma região ecoclimática e altitude semelhante, caracterizando-a como hidrológicamente homogênea. Segundo Azevedo (2010) para o preenchimento de falhas de séries históricas, podem-se utilizar procedimentos de regressão linear ou múltipla.

Ainda de acordo com Collischonn e Dornelles (2013), para análise de vazões máximas e mínimas é conveniente a definição do ano hidrológico em contraposição ao ano civil. Conforme Bertoni e Tucci (2007) e Lemos Filho et al. (2007), as análises preliminares a serem efetuadas nas séries históricas consistem no preenchimento de falhas e na verificação da consistência, ou seja, do grau de homogeneidade dos dados disponíveis em uma estação de coleta com relação às observações registradas em estações vizinhas.

3.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

A regionalização é uma alternativa para a obtenção de vazões em locais sem dados de medições, onde se pressupõe que a similaridade espacial das regiões permite que dados hidrológicos de regiões sem informações possam ser estimados através de ferramentas de regressão (Melati e Marcuzzo, 2016). Nesses casos, se faz necessária a aplicação de técnicas de transferência de informações de outros locais hidrológicamente semelhantes para a bacia hidrográfica em estudo. O procedimento de transferência de informações

de vazão denomina-se regionalização (BARBOSA et al., 2005).

Segundo Oliveira et al. (2010) a regionalização hidrológica é uma das formas encontradas para transferir informações de locais com registros existentes para locais onde não existem dados. Procura-se, nos modelos de regionalização de vazão, correlacionar o escoamento superficial gerado em uma bacia com variáveis explicativas, sobretudo as climáticas e morfométricas da bacia hidrográfica.

A regionalização de uma variável envolve a determinação da mesma em diferentes locais de uma região, normalmente definida por limites geográficos, considerando os limites da bacia hidrográfica. Os resultados da regionalização dependem da extensão e qualidade das informações disponíveis.

Segundo Tucci (2002), a regionalização pode ser dividida nas seguintes etapas: 1) definição dos limites da área a ser estudada; 2) definição das variáveis dependentes e explicativas da regionalização; 3) seleção dos dados das variáveis; e, 4) funções regionais: relações regionais e definição das regiões homogêneas.

A técnica de regionalização de vazões pode ser dividida em três tipos de métodos: métodos de regionalização dos parâmetros da distribuição de probabilidades, métodos de regionalização do evento com um determinado risco e métodos de regionalização da curva adimensional de frequências (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Com base nesses métodos, podem-se citar as principais metodologias propostas de regionalização de vazões: a metodologia tradicional descrita por ELETROBRÁS em 1985, a metodologia de interpolação linear, e a metodologia de Chaves et al. (2002). O desenvolvimento e aplicação das metodologias para vazões mínimas serão descritas na seção 3.3.2.

3.3 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS

3.3.1 Caracterização das vazões mínimas

De acordo com Tucci (2002) as vazões

mínimas representam os menores valores encontrados nas séries históricas de vazão. As vazões mínimas, também chamadas de vazões de estiagem, são aquelas que não atendem às necessidades da demanda hídrica. O termo vazão mínima foi definido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 1974 como “a vazão que escoar em uma determinada seção de um rio durante um período prolongado de seca”.

As vazões mínimas representam a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, sendo assim, seu conhecimento se torna fundamental ao planejamento e gestão dos recursos hídricos. No aspecto qualitativo da água, a vazão mínima é utilizada para determinar, por exemplo, a permissibilidade da descarga de efluentes (SMAKHTIN, 2001; BARI e SADEK, 2002). No aspecto quantitativo, as vazões mínimas são utilizadas, em projetos de navegação e de concessão do uso d'água, como é o caso de projetos de irrigação, abastecimento urbano e transposição, e para avaliação dos riscos de seca (MASIH et al., 2010; TSAKIRIS, NALBANTIS, CAVADIAS, 2011).

Deve-se destacar que a outorga requer o conhecimento da disponibilidade hídrica, baseada nas vazões mínimas ou regularizadas. Ao ser instituída uma vazão outorgável tendo por base uma vazão de referência, como um percentual, o órgão estabelece um limite para a apropriação da água (SANTOS e CUNHA, 2013; LANNA, 2006).

A vazão mínima é caracterizada pela magnitude, duração e frequência. As vazões médias mínimas com durações entre 7 e 30 dias, associadas a um período de retorno são as mais utilizadas, uma vez que, a vazão mínima diária não é representativa do período de estiagem. Muitos estudos e projetos utilizam a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos (Q 7,10) ou vazões associadas a uma permanência de 90% (Q 90) ou 95% (Q 95) do tempo. A vazão Q 7,10 é comumente utilizada como vazão de referência, principalmente como critério de outorga, nas licenças ambientais e na avaliação de impacto ambiental de obras hidráulicas (REGO, 2013; LUIZ, FERNANDES E JUNIOR, 2013; LISBOA et al., 2014).

Para Valença (2013) na gestão de recursos hídricos, a vazão de 95% de permanência (Q95%) é adotada como referência para concessão de outorgas de direitos de uso da água ou para definição da vazão remanescente a ser mantida a jusante de um aproveitamento de uso não consuntivo, conhecida como vazão ecológica. Segundo Pompeu et al. (2014), em estudo realizado para levantamento das vazões de referência utilizadas no Brasil, verificou-se que a região Nordeste (AL, BA, CE, ES, MA, PB, PE PI, RN, SE e TO) possui uma tendência a utilizar a vazão de referência Q 90%, enquanto que no Sudeste (SP, RJ e MG) a vazão mínima de referência Q7,10 é a mais utilizada, e no Centro-Oeste (GO, MT) usualmente utiliza-se a Q 95%, concluindo que o Brasil apresenta uma tendência regional para adoção das vazões de referência.

Para a caracterização das vazões mínimas, deve-se considerar três tipos de análises: análise de frequência, curvas de duração ou permanência e curva de depleção. A análise de frequência consiste em avaliar uma série de dados observados e obter a frequência de ocorrência de um determinado valor, maior ou menor que um dado nível de vazão, como por exemplo, a vazão mínima que se comporta como um valor extremo. Essa frequência de ocorrência pode ser determinada pela distribuição de probabilidade dos dados observados, que representa a população da qual a amostra foi retirada (TUCCI, 2002).

A curva de permanência de vazões demonstra a relação entre a vazão observada e as percentagens com que esta vazão é superada ou igualada durante um período de observação. A curva de depleção representa o período de esvaziamento do reservatório subterrâneo no hidrograma de uma bacia (TUCCI, 2002). A distribuição de probabilidade de vazões mínimas pode ser ajustada a uma distribuição empírica ou um modelo teórico. As distribuições de probabilidades mais utilizadas para as vazões mínimas são: Normal, Log-Normal, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull.

Segundo Euclides et al. (2001) não se

pode definir, a priori, a distribuição de probabilidades para descrever a frequência de vazões em hidrologia e, sim, selecionar uma família de curvas indicadas ao tipo de dados analisados e, em seguida, individualizar a lei de probabilidade que mais se adapta a interpretar cada série histórica disponível. Muitos trabalhos têm demonstrado que a distribuição de Weibull é a que apresenta os melhores ajustes para as vazões médias mínimas (BARBOSA et al., 2005; MAMUN, HASHIM e DAOUD, 2010; LOPES et al., 2017).

3.3.2 Aplicação e adequação das metodologias de regionalização de vazões mínimas

Dentre os métodos mais utilizados de regionalização de vazões mínimas está a metodologia tradicional (Eletrobrás, 1985) que utiliza equações de regressão regionais na delimitação de regiões hidrologicamente ou estatisticamente homogêneas, ou seja, regiões que possuem características físicas e climáticas semelhantes, denominadas de variáveis explicativas (LEMOS, 2006; WOLFF, 2013).

Segundo Pruski et al. (2012), as vazões mínimas estão associadas diretamente ao escoamento subterrâneo. No período de estiagem, o volume da vazão mínima é mantido pela recarga dos aquíferos, que vai depender dos fatores geológicos e variar para cada região (LUIZ, 2013). Logo, a definição de regiões homogêneas para a regionalização de vazões mínimas deve ser baseada principalmente nas condições hidrogeológicas da bacia, necessitando de informações sobre as principais características das formações da região, os principais aquíferos e suas características, já que o escoamento durante a estiagem vai ser determinado pelo tipo de aquífero no qual a bacia está assentada (TUCCI, 2002).

Sendo assim, para a regionalização de vazões mínimas, através do método tradicional, é necessário obter informações relacionadas às características físicas da bacia. No entanto, muitas vezes esses dados não estão disponíveis ou são escassos, fato que se torna uma grande limitação

para a aplicação do método. A ausência de informações fluviométricas nas bacias hidrográficas brasileiras também se torna uma restrição para o método (RODRIGUEZ, 2008). Existem ainda outras limitações na regionalização de vazões mínimas, as quais estão relacionadas à extrapolação dos resultados para bacias de menor porte, pois estas apresentam uma variabilidade no comportamento do aquífero o que pode ser responsável por causar erros muito grandes. Valores podem ser subestimados ou superestimados devido à falta de amostras de bacias pequenas (TUCCI, 2002).

Diante disso, com o objetivo de desenvolver outras metodologias que necessitem de menos informações ou que não necessitam de regiões homogêneas ou ainda com o objetivo de buscar novas alternativas para minimizar os riscos associados à extrapolação das equações de regionalização das vazões mínimas, o estudo e avaliação da adequação de diversos modelos de regionalização, têm sido objeto de pesquisa de diversos pesquisadores.

A metodologia baseada na interpolação linear, também conhecida como método de vazão específica ou Index Flood, ou ainda como método de curva adimensional regional, descrita por ELETROBRÁS (1985) estima as vazões de interesse em função das vazões correspondentes às áreas de drenagem das seções fluviométricas mais próximas, localizados à montante e, ou, a jusante do local onde se deseja estimar a vazão. O método não necessita de definição de regiões hidrologicamente homogêneas, sendo, portanto, utilizadas as mesmas equações ao longo de toda a bacia hidrográfica.

O método da interpolação linear modificado consiste em inserir a variável precipitação média, considerando assim que a vazão na seção de interesse é também proporcional à relação entre os volumes precipitados.

Chaves et al. (2002) propuseram um método para regionalização de vazões mínimas (Q 90%, 7d), que utiliza técnicas de interpolação e a extrapolação automáticas em

ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG's), com soluções que dependem da posição relativa da seção de interesse, em relação aos postos fluviométricos mais próximos. Tal método foi aplicado na bacia do Rio Itapicuru, localizada no Estado da Bahia. O método Chaves modificado consiste em inserir a variável precipitação média no método proposto por Chaves et al. (2002), sendo a vazão obtida na seção de interesse proporcional ao volume precipitado nas áreas analisadas.

Uma alternativa de regionalização foi desenvolvida por Silveira et al. (2005). O método proposto no estudo considera o princípio que foi demonstrado em Silveira e Tucci (1998), onde é considerado que séries parciais de dados de vazões em depleção, ou seja, dados com poucos registros, sem dados de cheias, juntamente com informações fisiográficas regionais tradicionais, podem representar e caracterizar a disponibilidade hídrica de pequenas bacias. Nesse sentido o método da regio-depleção foi desenvolvido por Silveira et al. (2005) e aplicado na Bacia do Rio Santa Maria, no Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia considerou o efeito da depleção regional e, obtendo os fatores de proporcionalidade de vazões mínimas entre pontos de uma rede fluvial, apresentou melhorias nas estimativas em comparação com outros métodos como o da regionalização e proporção de áreas, aplicados aos mesmos dados.

Rodriguez (2008) e Pruski et al. (2013) utilizaram em seus respectivos estudos duas novas variáveis explicativas, a vazão equivalente ao volume precipitado (Peq) e a vazão equivalente ao volume precipitado menos um fator de abstração da precipitação correspondente a 750 mm (Peq. 750). Esse fator considera a porção da precipitação que não foi convertida em vazão devido a outros processos, em especial à evapotranspiração.

Pruski et al. (2012) e Pruski et al. (2013) utilizaram a Peq 750 como variável explicativa e observaram uma evidente melhora da regionalização da Q_{7,10} para a bacia do Pará, e para sub bacia do rio Paracatu. O uso dessas variáveis também minimizou o risco associado ao

uso das equações de regionalização em regiões de extrapolação. Rego (2013), com o objetivo de aprimorar a metodologia de regionalização de vazões mínimas, utilizou a evapotranspiração real (ETR) como variável explicativa, o que permitiu melhorias nos índices estatísticos, melhor representação física e a predição de valores mais seguros que as outras variáveis analisadas.

Wolff (2013) sugeriu uma nova metodologia de regionalização para o Estado de São Paulo que apresentou melhor desempenho comparado a antiga metodologia proposta por Liazi et al. (1988) com as seguintes vantagens: não é dependente da inserção da precipitação média anual, não é vinculado à determinação de regiões hidrologicamente homogêneas e suspeita-se que possa ser aplicado a todos os tamanhos de bacias.

Elesbon et al. (2015) propuseram uma metodologia baseada em análises estatísticas multivariadas de componentes principais e de agrupamento, com objetivo de identificar as variáveis mais representativas em estudos de regionalização de vazões mínimas e ainda otimizar a obtenção das regiões hidrologicamente homogêneas para a bacia hidrográfica do Rio Doce. A metodologia proposta para identificação do número de regiões homogêneas apresentou grandes resultados, sendo que as variáveis independentes mais representativas foram área de drenagem da bacia e precipitação total do semestre chuvoso.

Molina et al. (2014) fizeram a regionalização de vazões mínimas com base em três metodologias distintas: utilização de técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), vazão específica e conservação de massas. O método de regionalização baseado na conservação de massas proposto por Pereira (2004) foi o que melhor representou o comportamento das vazões mínimas em bacias com escassos registros hidrológicos.

Métodos de regionalização de vazões foram aplicados e avaliados por Samuel, Coulibaly e Metcalfe (2011) em 93 bacias localizadas na província de Ontário, Canadá. Os

resultados da análise mostraram que a abordagem de regionalização, vinculada com o emprego de técnicas de interpolação e extrapolação, produz melhor desempenho.

Em um estudo realizado por Mamun, Hashim e Daoud (2010) foram desenvolvidas equações de regressão multivariada para sete regiões na Península da Malásia, onde foram utilizados 82 postos fluviométricos na regionalização de vazões mínimas. As equações apresentaram alta correlação indicando o bom desempenho do modelo para a estimativa das vazões.

4. CONCLUSÕES

Um dos maiores desafios em hidrologia é a análise do comportamento real relacionado à disponibilidade hídrica natural em uma bacia hidrográfica, a qual é representada pelas vazões mínimas. A fim de tornar possível um melhor conhecimento acerca destes dados, técnicas de regionalização de vazões vem sendo utilizadas. Para tal, pressupõe-se que a similaridade espacial de determinadas regiões resulta em similaridade de dados hidrológicos, podendo, então, usar de estimativas para defini-los.

A regionalização de uma função ou variável é estabelecida através de um dos seguintes critérios: estabelecimento da relação empírica entre valores da função e características conhecidas, especialmente, do sistema hidrológico e estabelecimento da função com base nos valores do item anterior ou de relações adimensionais. Algumas das principais funções hidrológicas utilizadas em recursos hídricos são: curva de probabilidade de vazões máximas e mínimas, curva de permanência e curva de regularização.

Assim, diante do exposto, o estudo e avaliação da adequação de diversos modelos de regionalização, têm sido objeto de pesquisa de diversos pesquisadores com o objetivo de desenvolver outras metodologias que necessitem de menos informações ou que não necessitam de regiões homogêneas ou ainda com o objetivo de buscar novas alternativas para minimizar os

riscos associados à extrapolação das equações de regionalização das vazões mínimas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Agência Nacional das Águas**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacaoeshidrologicas/informacoeshidro.aspx>>. Acesso em: maio de 2017.

ALTERACH, J.; BARONTINI, S.; BAVERA, D. ; CADORE, A.; DE LOTTO, P.; ZAINA, G. **Regionalization procedures for the estimation of daily flow duration curves in the Italian Alps**. Geophysical Research Abstracts, v. 8, 2006.

ALVES, T. L. B.; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, M. T. **Análise morfométrica da microbacia hidrográfica riacho namorado, São João do Cariri-PB: uma ferramenta ao diagnóstico Físico**. Revista de Geografia (UFPE) V. 31, No. 3, 2014.

ANTONELLI, V; THOMAZ, E L. Caracterização do meio físico da Bacia do Arroio Boa Vista-Guamiranga-PR. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.8, n.21, p.46 – 58. Mar. 2007.

AZEVEDO, J. R. G. de (Org.). **Hidrometria aplicada à gestão dos recursos hídricos**. Recife: Universitária da UFPE, 2010. 484 p.

BAENA, L. G. N.; SILVA D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. **Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul**. Revista Engenharia na Agricultura, Jaboticabal. Vol. 24, n.3, 2004, 612-624 p.

BARBOSA, S. E.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; RODRIGUES, V. C. **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**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 10 , n 1,– Campo Grande/MS: CBESA, 2005, 64-71 p.

BARI, M. F.; SADEK, S. **Regionalization of low-flow frequency estimates for rivers in northwest Bangladesh**. Friend 2002 - Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice (274): 257-263. 2002.

BELLAMY, W. D. **Slow sand filtration: influences of selected process variables**. Journal AWWA, Vol. 77, n. 12, 1985, 62-66 p.

BERTONI J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Editora UFRGS, 2007, p.177-241.

- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. **Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográficas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 7, n. 3, 2002, 43-51 p.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013. 336 p.
- DINPASHOH, Y.; FAKHERI-FARD, A.; MOGHADDAM, M.; JAHANBAKHS, S.; MIRNIA, M. **Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods**. Journal of Hydrology, v.297, 2004, 109-123 p.
- ELESBON, A. A. A.; SILVA, D. D.; SEDIYAMA, G. C.; GUEDES, H. A. S.; RIBEIRO, C. A. A. S.; RIBEIRO, C. B. M. **Multivariate statistical analysis to support the minimum stream flow regionalization**. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 5, 2015, 838-851 p.
- ELETROBRÁS. Centrais de Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985.
- EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. SANTOS, R. M. **Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.6, n.2, p.81-105, 2001.
- JORGE SANTOS, P. V. C.; CUNHA, A.C. **Outorga de Recursos Hídricos e Vazão Ambiental no Brasil: Perspectivas Metodológicas Frente ao Desenvolvimento do Setor Hidrelétrico na Amazônia**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.18, n.3, p. 81-95, 2013.
- LANNA, A. E. **Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Formoso no Estado do Tocantins**. 1 disco compacto. SDP Nº 002/GOP-SEPLAN. Estado do Tocantins. 2006.
- LAKATOS, E. V.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- LEIVAS, J. F.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **Risco de deficiência hídrica decenal na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.2, p.397-407, 2006.
- LEMONS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias**. 2006. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- LEMONS FILHO, L. C. DE A.; CARVALHO, L. G. DE; EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. M. T. DE; DANTAS, A. A. A. **Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para Minas Gerais**. Ciência e Agrotecnologia, v.31, n.5, 2007, 1462-1469 p.
- LISBOA, L.; CORRÊDO, L. P.; SILVA, D. D.; ULIANA, E. M.; MOREIRA, M. C. **Estimativa e regionalização das vazões mínimas anuais e quadrimestrais na Bacia do Piracicaba-MG**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, n.18, 2014, 1580-1592 p.
- LOPES, T. R.; PRADO, G.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; ANTONIEL, L. S. **Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí - PR**. IRRIGA, v. 21, n. 1, 2016, 188-201 p.
- LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; PRADO, G.; PAULINO, J.; ALMEIDA, F. T. **Regionalization of maximum and minimum flow in the Teles Pires Basin, Brazil**. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering. V. 37 – nº 1 – Jan. /fev – Jaboticabal, 2017, 54-63 p.
- LUIZ, S. F.; FERNANDES, W. D. S.; JUNIOR, D. S. R. **Regionalização Hidrológica de Vazões Mínimas por meio dos Métodos OLS e WLS Aplicada à Bacia do Alto São Francisco**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 4, 2013, 231-241 p.
- MAMUN, A. A.; HASHIM, A.; DAOUD, J. I. **Regionalization of low flow frequency curves for the Peninsular Malaysia**. Journal of Hydrology. Vol. 381, 2010, 174-180 p.
- MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – V. 15 - nº 9 - Campina Grande, PB, UAEA/UFCEG, 2011, 1054-1061 p.
- MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. O.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – V. 15 - nº 9 - Campina Grande, PB, UAEA/UFCEG, 2011, 1054-1061 p.
- 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, 2010, 188-201p.
- MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F.N. **Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas**. Ciências e Natura, Santa Maria v.38 n.2, 2016, Mai.- Ago. p. 722 – 739.

- MOLINA, S. K. M.; ALMEIDA, I. K.; STEFFEN, J. L.; ALVES SOBRINHO, T. **Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões**. Geociências (São Paulo), v. 33, n. 3, 2014, 506-515 p.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte, CPRM, 2007. 552p.
- OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da Bacia do Rio Grande**. Dissertação-Universidade Federal Viçosa, Viçosa, MG, 187p. 2008.
- OLIVEIRA, Luiz F. C. de et al . Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista brasileira. engenharia agrícola ambiental**, Campina Grande , v. 14, n. 11, p. 1186-1192, Nov. 2010 .
- OLIVEIRA, V. A. **Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 E GD2**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 99p. 2013.
- OMM - Organização Meteorológica Mundial. International Glossary of Hydrology, WMO, Geneva, 1974.
- 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.
- PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 105 p. 2004.
- POMPEU, R. D. M. et al.,. **A outorga de direito de uso de recursos hídricos**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7, Natal. ABRH, p. 1, 2014.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. **Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos**. Water Sources and Irrigation Management – V. 1 – nº 1 – Campina Grande, PB, UFRB/INS, 51-59 p. 2012.
- PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; RODRIGUEZ, R. del G. **Improved regionalization of stream flow by use of the stream flow equivalent of precipitation as an ex-planatory variable**. Journal of Hydrology, v.476, 52-71 p. 2013.
- RAZAVI, T; COULIBALY, P. **Stream flow prediction in ungagged basins: review of regionalization methods**. J. Hydrologic Eng., v.18, n. 8, 2013, 958-975 p.
- REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. Dissertação (Magister Scientiae em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 62 p. 2013.
- RODRIGUEZ, R. D. G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 195p. 2008.
- SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. **Estimation of Continuous Stream flow in Ontario Ungagged Basins: Comparison of Regionalization Methods**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 16. n. 5, 2011, 447-459 p.
- SILVEIRA G. ; TUCCI, C. E. M. **Monitoramento em Pequenas Bacias para a Estimativa de Disponibilidade Hídrica**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, N.3, jul/set, 1998, 97-110 p. 1998.
- SILVEIRA, G. L.; SILVEIRA, A. L. L.; CRUZ, J. C.; CRUZ, R. C. (2005) **Regionalização da Depleção Regional com Dados Primários de Vazão**. Jul/Set. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Brasil, v. 10, n. 3, 43-52 p. 2005.
- SMAKHTIN, V.U. **Low flow hydrology: a review**. Journal of Hydrology. v.240, 147-186. 2001.
- STRECK, N. A.; BURIOL, G. A.; Heldwein, A. B.; GABRIEL, L. F.; PAULA, G. M. de. **Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a oscilação decadal do Pacífico**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, n.12, p.1553-1561, 2009.
- TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. D.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. **Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil**. Ambi-Agua, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120 -142, 2012.
- TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A.L. **Morphometric characteristics of Cachoeira das Pombas watershed, Guanhões - MG, Brazil**. Revista Árvore 30 vol. 5 p. 849-857, 2006.
- TSAKIRIS, G.; NALBANTIS, I.; CAVADIAS, G. **Regionalization of low flows based on canonical correlation analysis**. Advances in Water Resources, Vol.34, 2011, 865-872 p. 2011.
- TSAKIRIS, G.; NALBANTIS, I.; CAVADIAS, G. **Regionalization of low flows based on canonical correlation analysis**. Adv. Water Resour. v.34, 2011, 865-872.
- TUCCI, C. E. M. **Regularização de vazões**. 1 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002.
- WOLFF, W. A. **Avaliação e nova proposta de regionalização para o Estado de São Paulo**. Dissertação – Engenharia de Sistemas Agrícolas - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2013, 111p.
- YOUNG, A.R. **Stream flow simulation within UK ungagged catchments using a daily rainfall –runoff model**. Journal of Hydrology. v.320, 155–172. 2006.