Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Avaliação de metodologias de regionalização hidrológica para a Bacia Hidrográfica
do Alto Rio Jaguari**

Luísa Carolina Silva Lelis

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Luísa Carolina Silva Lelis
Engenheira Florestal

**Avaliação de metodologias de regionalização hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio
Jaguari**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador
Prof. Dr. **SÉRGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE
BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Lelis, Luísa Carolina Silva

Avaliação de metodologias de regionalização hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Jaguari / Luísa Carolina Silva Lelis. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 -- Piracicaba, 2019. 84 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Hidrologia 2. Sistema Cantareira 3. Bacia do Rio Jaguari 4. Vazões de referência I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

Elci Maria da Silva Lelis e Camilo de Lelis Filho,

por tudo,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao professor Sérgio N. Duarte, que me abriu as portas da ESALQ e acreditou no meu trabalho para que eu pudesse desenvolver esta Dissertação. Durante esta orientação o professor Sérgio não apenas compartilhou conhecimentos técnicos; ele mostrou ser um amigo preocupado com seus orientados. Obrigada!

Aos amigos Adriano B. Pacheco, Hugo de C. Ricardo, Jéssica G. Nascimento, Larissa B. Moura, Pedro R. F. Sampaio companheiros da Pós-Graduação, parceiros de vida e porto seguro para os momentos desta fase.

Aos amigos do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas Ailson, Ana (Gonça e Maria inclusos), Beth, Dani, Débora, Diego, Fernanda, Isa, Luiz, Rogério, Thaís, Thuane, Timotéo e Wagner pela convivência amigável, risadas compartilhadas e conhecimentos divididos todos os dias.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Ângela, Sr. Antônio, Bia, Davilmar, Gilmar, Ivone e Paulinha.

Aos meus pais, Elci e Camilo, responsáveis por tudo que sou hoje.

Às minhas irmãs, Flávia e Isabela, pelo incentivo e ajuda nos estudos desde a época da pré-escola.

À Jennifer Campoli, pelo companheirismo e apoio incondicional durante os últimos dois anos.

Aos Engenheiros Gré de Araújo Lobo e Luiz Roberto Moretti do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), responsável pela ideia inicial dessa Dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1. REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA	17
3.2. ETAPAS DA REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	18
3.3. O DIREITO DO USO DA ÁGUA	22
3.4. VAZÃO OUTORGÁVEL E VAZÃO DE REFERÊNCIA	23
3.5. CARACTERIZAÇÃO DAS TRÊS REGIONALIZAÇÕES QUE SERÃO ABORDADAS NESTE TRABALHO	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.2. CÁLCULO DAS VAZÕES DE REFERÊNCIA POR INTERMÉDIO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	44
4.3. CÁLCULO DAS VAZÕES DE REFERÊNCIA POR INTERMÉDIO DOS DIFERENTES MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA	50
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MODELOS	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1. DELIMITAÇÃO DAS BACIAS DE DRENAGEM	55
5.2. CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA PARA AS BACIAS DE DRENAGEM	55
5.3. RESULTADOS DAS VAZÕES Q_{90} , Q_{95} , Q_{MED} E $Q_{7,10}$ CALCULADAS POR INTERMÉDIO DAS SÉRIES HISTÓRICAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	56
5.4. AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA TRABALHADOS	60
5.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARI	67
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	73

RESUMO

Avaliação de metodologias de regionalização hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Jaguari

O gerenciamento de recursos hídricos se propõe a resolver os problemas resultantes do uso intensivo da água, produto do crescimento econômico e populacional, e preservar as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, assim como garantir que esse recurso se mantenha com oferta adequada. No Brasil, país cujas dimensões são continentais, o controle dos cursos de água frequentemente acaba não englobando todas as regiões de interesse de um estudo. Conhecida esta carência, a técnica conhecida como Regionalização Hidrológica aparece como uma opção para a obtenção de informações hidrológicas em regiões sem ou com poucos dados, fundamentando-se na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que toleram essa transferência. Diante dos diversos modelos de regionalização desenvolvidos e da necessidade de obtenção das informações hidrológicas de forma facilitada, é fundamental o estudo comparativo de metodologias de regionalização de vazões com o objetivo de se conhecer a mais adequada às características regionais de cada bacia hidrográfica. Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar as estimativas da vazão de referência $Q_{7,10}$ e também das vazões mínimas de permanência na bacia do Rio Jaguari (divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo e importante afluente do Sistema Cantareira) obtidas por diferentes técnicas de regionalização, quais sejam, os métodos propostos por Liazi et al. (1988) e Wolff et al. (2014) para o Estado de São Paulo e o IGAM (2012) para o Estado de Minas Gerais. O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, a qual localiza-se entre os estados supracitados. A partir dos dados históricos de vazão das estações presentes nesta Bacia Hidrográfica foram calculadas a Q_{med} , Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ referente a cada uma das cinco estações fluviométricas estudadas. Em seguida, estas mesmas variáveis foram estimadas utilizando as metodologias de regionalização propostas por Liazi et al. (1988), Wolff et al. (2014) e IGAM (2012). A fim de se definir qual o método de regionalização hidrológica mais adequado para a região do alto do Rio Jaguari, os resultados das vazões calculadas por intermédio das séries históricas colhidas por estações fluviométricas foram comparadas com as estimadas pelos modelos supracitados mediante análise de índices estatísticos, tais como, índice de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), viés percentual (PBIAS), razão entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados (RSR) e o coeficiente de determinação (R^2). O modelo de Liazi et al. (1988) apresentou ajuste, classificado pelo índice de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2), como muito bom, mostrando-se superior aos demais métodos nessa região. A metodologia de IGAM (2012) demonstrou ajuste insatisfatório para os indicadores estatísticos NSE, PBIAS e índice d e muito bom para o coeficiente de determinação (R^2). A nova proposta de Regionalização Hidrológica para o estado de São Paulo de Wolff et al. (2014) apresentou ajuste, classificado pelos índices de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), viés percentual (PBIAS) e coeficiente de determinação (R^2), como, no geral, insatisfatório; por outro lado o comportamento gráfico dos resultados obtidos demonstrou potencialidade para o uso desse método. Recomenda-se a aplicação de estudos comparativos semelhantes em outras Sub-Bacias localizadas entre os estados de Minas Gerais e São Paulo para corroborar ou não com as conclusões do presente trabalho.

Palavras-chave: Hidrologia; Sistema Cantareira; Bacia do Rio Jaguari; Vazões de referência.

ABSTRACT

Assessment of Hydrological Regionalization methodologies for the Upper Jaguari River Basin

Water resources management is meant to solve problems caused by the intensive use of this resource, which is the product of economic and population growth. Water resources management is also responsible for preserving the hydrological, biological and chemical functions of ecosystems, as well as ensure that this resource is maintained with the adequate supply for future generations. In Brazil, a country with continental dimensions, streamflow gauge coverage is far from satisfactory. Therefore, the Hydrological Regionalization technique is as an option to estimate hydrological information in regions with few or no data. This methodology is based on the spatial similarity of functions, variables and parameters that tolerate this transference. The number of regionalization models and the need to easily access hydrological data transformed comparative studies of streamflow regionalization methodologies into a fundamental topic in Hydrology. For this reason, the goal of this paper is to assess the models settled by Liazi et al. (1988), Wolff et al. (2014) and IGAM (2012) related to the variables $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} and Q_{med} in Jaguari River Basin, which is located between Minas Gerais and São Paulo states and constitutes an important affluent to the Cantareira System. Firstly, the $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} and Q_{med} were calculated using the historical flow data from five fluviometric stations located in Jaguari River Basin. Then, these same variables were estimated using the regionalization methodologies proposed by Liazi et al. (1988), Wolff et al. (2014) and IGAM (2012). In order to determine the best hydrological regionalization method for the upper Jaguari River Basin, the flow rates results calculated with the historical series were compared to those estimated by the models. The forecast was determined utilizing the following indicators: index of agreement (d), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), percent bias (PBIAS), the ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data (RSR) and coefficient of determination (R^2). Liazi et al. (1988) presented the best performance when compared to the other two methods, its behavior was classified as very good by the index of agreement (d), the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and the coefficient of determination (R^2). IGAM (2012) exhibited an unsatisfactory fit for the statistical indicators of NSE and PBIAS. On the other hand, this method was classified as very good when the coefficient of determination (R^2) was analyzed. The new proposal of Hydrological Regionalization for São Paulo state (WOLFF et al., 2014) presented an adjustment, classified by the index of agreement (d), the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), the percentage bias (PBIAS) and coefficient of determination (R^2), as unsatisfactory, in general. The graphical behavior, however, demonstrated a good potential for future use. In conclusion, it is recommended to apply similar comparative studies in other sub-basins located between the states of Minas Gerais and São Paulo to corroborate or not with the presented results.

Palavras-chave: Hydrology; Cantareira System; Jaguari River Basin; Reference water flow.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 21 REGIÕES HIDROLOGICAMENTE SEMELHANTES UTILIZADAS NA REGIONALIZAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	28
FIGURA 2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO PARÂMETRO C USADO PARA ESTIMATIVA DA Q_{7,T} SEGUNDO LIAZI ET AL. (1988).	31
FIGURA 3. DIVISÃO DAS UNIDADES DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS – UPGRHS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. FONTE: (IGAM, 2012).....	35
FIGURA 4. REGIÃO DE ESTUDO DO TRABALHO.....	39
FIGURA 5. LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS NO ESTUDO.	42
FIGURA 6. MAPA DE ISOIETAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. FONTE: (BRAGA JR ET AL., 1991).	44
FIGURA 7. BACIAS DE DRENAGEM DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NO ESTUDO.....	55
FIGURA 8. CURVAS DE PERMANÊNCIA CALCULADAS A PARTIR DAS SÉRIES DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS NESSE TRABALHO.	57
FIGURA 9. GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE VAZÕES ESTIMADAS PELO MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DE LIAZI ET AL. (1988) (ORDENADAS) E CALCULADOS PELAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS (ABSCISSAS). EM QUE A = Q_{MED}, B = Q₉₀, C = Q₉₅, D = Q_{7,10} E 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.....	62
FIGURA 10. GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE VAZÕES ESTIMADAS PELO MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DO IGAM (2012) (ORDENADAS) E CALCULADOS POR MEIO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS (ABSCISSAS). EM QUE A = Q_{MED}, B = Q₉₀, C = Q₉₅, D = Q_{7,10} E 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.....	64
FIGURA 11. GRÁFICOS DE DISPERSÃO ENTRE VAZÕES ESTIMADAS PELO MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DE WOLFF ET AL. (2014) (ORDENADAS) E AS CALCULADAS POR INTERMÉDIO DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS (ABSCISSAS). EM QUE A = Q_{MED}, B = Q₉₀, C = Q₉₅, D = Q_{7,10} E 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.	66
FIGURA 12. DESEMPENHO DOS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO ESTUDADOS NO QUE DIZ RESPEITO AO ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA (D) PARA CADA PARÂMETRO AVALIADO.	67
FIGURA 13. DESEMPENHO DOS MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO ESTUDADOS NO QUE DIZ RESPEITO AO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R²) PARA CADA PARÂMETRO AVALIADO.	67
FIGURA 14. DESEMPENHO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS ESTUDADOS NO QUE DIZ RESPEITO AO ERRO RELATIVO PERCENTUAL PARA CADA PARÂMETRO AVALIADO.	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PARÂMETROS REGIONAIS DA REGIONALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO SEGUNDO LIAZI ET AL. (1988).....	29
TABELA 2. ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS ESTUDADAS	42
TABELA 3. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA (ADAPTADO DE MORIASI ET AL., 2015).....	53
TABELA 4. PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL REFERENTE ÀS BACIAS HIDROGRÁFICAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS CALCULADAS POR INTERMÉDIO DA MÉDIA PONDERADA ENTRE ISOIETAS CONSECUTIVAS	56
TABELA 5. DADOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA CALCULAR Q_{95}, Q_{90} E Q_{MED}, E SEUS RESPECTIVOS VALORES ESTIMADOS PELAS SÉRIES HISTÓRICAS	57
TABELA 6. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS USADAS PARA CALCULAR A VAZÃO MÍNIMA COM DURAÇÃO DE SETE DIAS E PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS, RESPECTIVOS VALORES DE $Q_{7,10}$ ($M^3.S^{-1}$), INTERVALOS DE CONFIANÇA E AMPLITUDE DO INTERVALO PARA A ESTAÇÃO 62590000	58
TABELA 7. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS USADAS PARA CALCULAR A VAZÃO MÍNIMA COM DURAÇÃO DE SETE DIAS E PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS, RESPECTIVOS VALORES DE $Q_{7,10}$ ($M^3.S^{-1}$), INTERVALOS DE CONFIANÇA E AMPLITUDE DO INTERVALO PARA A ESTAÇÃO 62625000	58
TABELA 8. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS USADAS PARA CALCULAR A VAZÃO MÍNIMA COM DURAÇÃO DE SETE DIAS E PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS, RESPECTIVOS VALORES DE $Q_{7,10}$ ($M^3.S^{-1}$), INTERVALOS DE CONFIANÇA E AMPLITUDE DO INTERVALO PARA A ESTAÇÃO 62622000	59
TABELA 9. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS USADAS PARA CALCULAR A VAZÃO MÍNIMA COM DURAÇÃO DE SETE DIAS E PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS, RESPECTIVOS VALORES DE $Q_{7,10}$ ($M^3.S^{-1}$), INTERVALOS DE CONFIANÇA E AMPLITUDE DO INTERVALO PARA A ESTAÇÃO 3D-001.....	59
TABELA 10. DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS USADAS PARA CALCULAR A VAZÃO MÍNIMA COM DURAÇÃO DE SETE DIAS E PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS, RESPECTIVOS VALORES DE $Q_{7,10}$ ($M^3.S^{-1}$), INTERVALOS DE CONFIANÇA E AMPLITUDE DO INTERVALO PARA A ESTAÇÃO 62620000	59
TABELA 11. RESULTADOS DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA POR MORIASI ET AL. (2015) PARA O MODELO DE LIAZI ET AL. (1988)	61
TABELA 12. CLASSIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO PARA OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA POR MORIASI ET AL. (2015) APLICADAS AO MODELO DE LIAZI ET AL. (1988)	61
TABELA 13. RESULTADOS QUANTITATIVOS DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA POR MORIASI ET AL. (2015) PARA O MODELO DO IGAM (2012)	63
TABELA 14. CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DOS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA SEGUNDO MORIASI ET AL. (2015), PARA O MODELO DO IGAM (2012).....	63
TABELA 15. R^2 PARA O MODELO DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE IGAM (2012)	64
TABELA 16. RESULTADOS QUALITATIVOS DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE	

REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA POR MORIASI ET AL. (2015) PARA O MODELO DE WOLFF ET AL. (2012).....	65
TABELA 17. CLASSIFICAÇÃO QUALITATIVA DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SEGUNDO OS ÍNDICES ESTATÍSTICOS RECOMENDADOS PARA MODELOS DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA POR MORIASI ET AL. (2015), APLICADO A WOLFF ET AL. (2014)	65
TABELA 18. R² E D PARA O MODELO DE REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE WOLFF ET AL. (2014), APLOCADO À BACIA DO PRESENTE ESTUDO.....	65

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Cantareira é um conjunto de captura e de tratamento de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP); o mesmo foi criado com o objetivo de abastecer 8,8 milhões de pessoas. É considerado um dos maiores sistemas produtores de água no mundo, abrangendo 12 municípios em dois estados e produz cerca de 33 mil litros de água por segundo (WHATELY e CUNHA, 2007).

A crise hídrica histórica no Sudeste do Brasil em 2014-2015 começou em São Paulo em outubro de 2013 e se estendeu a outros estados da região Sudeste ao longo de 2014 e 2015. O sistema Cantareira, que no pico da crise hídrica atendeu 5 milhões de pessoas na região metropolitana de São Paulo, voltou a fornecer água para 7,4 milhões de habitantes em abril de 2016 (SABESP, 2016).

A fim de se evitar a situação vivida pelos cidadãos paulistas neste período de crise, o gerenciamento de recursos hídricos se propõe a resolver os problemas resultantes do uso intensivo da água, produto do crescimento econômico e da concentração populacional, e preservar as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, assim como garantir que esse recurso se mantenha com oferta adequada (CRUZ e TUCCI, 2008). Para isso, a outorga do direito de uso da água, instrumento da Lei Federal nº 9.433 de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, tem como objetivo assegurar o monitoramento quantitativo e qualitativo dos usos da água (BRASIL, 1997).

Os critérios técnicos relativos aos processos de outorga em cursos de água estaduais são de domínio de cada Estado. Tanto Minas Gerais quanto São Paulo adotam como vazão de referência a $Q_{7,10}$ (vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência).

Em Minas Gerais, a portaria IGAM nº 49/2010 determina o percentual de 30% da $Q_{7,10}$ como o limite máximo de derivações consuntivas a serem outorgadas em cada seção da bacia hidrográfica considerada, devendo ficar garantido, em todos os casos, fluxos residuais mínimos a jusante equivalentes a 70% da $Q_{7,10}$ (IGAM, 2010).

Já em São Paulo, a Lei 9034/94 estabelece que, quando a soma das vazões captadas em uma determinada bacia hidrográfica, ou em parte desta, superar 50% da respectiva vazão de referência ($Q_{7,10}$), a mesma será considerada crítica e haverá gerenciamento especial (SÃO PAULO, 1994).

No Brasil, país cujas dimensões são continentais, o controle dos cursos de água frequentemente acaba não englobando todas as regiões de interesse de um estudo (MELATI,

2016); este fato proporciona desafios relevantes na estimativa da disponibilidade de água superficial nas bacias hidrográficas. Por esta razão, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos que ampliem as informações fluviométricas existentes e, em paralelo ao procedimento de outorga, propaguem ações técnicas que mitiguem ou eliminem o efeito da carência de dados (SILVEIRA et al., 1998).

Conhecida esta carência, a técnica chamada de regionalização aparece como uma opção para a obtenção de informações hidrológicas em regiões sem ou com poucos dados, fundamentando-se na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que toleram essa transferência (TUCCI, 2002).

Diante dos diversos modelos de regionalização desenvolvidos e da necessidade de obtenção das informações hidrológicas de forma facilitada, é importante o estudo comparativo de metodologias de regionalização de vazões com o objetivo de se conhecer a mais adequada às características regionais de cada bacia hidrográfica (MOREIRA e SILVA, 2014).

O modelo de regionalização hidrológica adotado pelo Estado de Minas Gerais (IGAM, 2012), por exemplo, utiliza como variáveis independentes a área de drenagem (A), a vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}), considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 750 mm. Já o modelo de regionalização indicado por Liazi et al. (1988) para o Estado de São Paulo propõe como variável explicativa da vazão a precipitação média anual e a área de drenagem.

Isto posto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar as estimativas da vazão de referência $Q_{7,10}$ e também as vazões mínimas de permanência na região do alto Rio Jaguari (divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo e importante afluente do Sistema Cantareira) obtidas por diferentes técnicas de regionalização, quais sejam, os métodos propostos por Liazi et al. (1988) e Wolff et al. (2014) para o Estado de São Paulo e o IGAM (2012) para o Estado de Minas Gerais.

A hipótese foi testar se novas técnicas de regionalização hidrológica (Wolff et al. (2014) e IGAM (2012)) tem a capacidade de superar a técnica de Liazi et al. (1988)

2. OBJETIVOS

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Delimitar as bacias de drenagem das estações fluviométricas utilizadas neste estudo;
- b) Determinar a precipitação média anual das bacias de drenagem das estações fluviométricas utilizadas neste estudo;
- c) Cálculo das vazões de referência por intermédio das séries históricas e das metodologias propostas;
- d) Avaliação dos modelos de regionalização hidrológica estudados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Regionalização Hidrológica

3.1.1. Fundamentos

Certas variáveis hidrológicas nem sempre satisfazem às necessidades de informações carecidas em estudos de hidrologia. Por esta razão, a fim de se resolver este problema, faz-se frequentemente o uso de equações empíricas ou a extrapolação da curva regional de frequências (LUIZ, 2013).

Em Hidrologia, a técnica que permite a transferência de dados entre pontos onde há um posto fluviométrico instalado para pontos onde não há, é denominada regionalização; esta tem o objetivo de melhorar o aproveitamento da malha hidrológica (RAO e SRINIVAS, 2006; SADRI e BURN, 2011).

De acordo com Silva et al. (2003), a implantação da regionalização geralmente resulta da busca da correlação entre a variável em estudo e indicadores de clima, topografia e geologia que expliquem a mesma. Estas relações apresentam melhores resultados ao passo que as variáveis independentes escolhidas tenham variabilidade na região e tenham significância ao explicar o comportamento da variável dependente.

Para Tucci (2000), a regionalização consiste em um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou insuficientes. Segundo o mesmo autor, a regionalização pode ser utilizada para: melhor explorar as amostras pontuais e, em consequência, melhorar as estimativas das variáveis; verificar a consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observação.

Segundo Tucci (2000), o princípio da regionalização se baseia na similaridade espacial e pode ser elaborada para:

- a) Funções estatísticas de variáveis hidrológicas: curva de probabilidade de vazões máximas, médias ou mínimas; curva de probabilidade de precipitações máximas entre outras;
- b) Funções específicas que relacionam variáveis: curva de regularização, curva de infiltração, curva de permanência; e
- c) Parâmetros de modelos hidrológicos: características do hidrograma unitário; parâmetros de outros modelos hidrológicos.

A fim de se efetuar um trabalho de regionalização hidrológica é necessária a definição de regiões hidrológicamente homogêneas, ou seja, definir uma região que possua desempenho similar nos processos hidrológicos, em toda a sua área. Em uma região hidrológicamente homogênea, as várias características físicas e climáticas possuem pequena variabilidade e sua delimitação decorre da metodologia escolhida. Em uma mesma bacia, conforme for a variável de interesse, diferentes regiões hidrológicamente homogêneas podem ser estabelecidas, visto que os princípios que regem, por exemplo, o comportamento das vazões máximas é diferente daqueles que determinam as vazões mínimas (SOUSA et al., 2009).

Os resultados decorrentes de uma regionalização não substituirão observações feitas em campo; contudo, as decisões feitas com base nesses resultados serão sempre superiores àquelas normalmente praticadas no meio técnico, que se baseiam em perigosas extrapolações apoiadas apenas em sentimentos individuais (PESSOA, 2015).

Tucci (2002) indica que, independentemente da informação hidrológica a ser regionalizada, é interessante que a construção do modelo regional cumpra às seguintes etapas: (1) definição dos limites da área a ser estudada; (2) determinação da variável dependente e possíveis variáveis explicativas; (3) seleção dos dados e cálculo de variáveis; e (4) definição das áreas com comportamento hidrológico semelhante e estimação das relações regionais.

Em 1985 a Eletrobrás, publicou um documento, no qual adotou o método da curva adimensional regional, genericamente designado de index-flood (ELETROBRÁS, 1985), o qual foi elaborado pelo National Environmental Research Center (NERC), por intermédio de análises de métodos estatísticos aplicados à hidrologia (NERC, 1975) e que se baseia nas seguintes etapas: (1) seleção e análise dos dados básicos; (2) identificação de regiões hidrológicamente homogêneas; e (3) ajuste do modelo de regressão.

3.2. Etapas da regionalização hidrológica

3.2.1. Seleção e análise dos dados básicos

Entre as etapas importantes no processo está a seleção dos parâmetros explicativos da variável a regionalizar (ANDRADE; HAWKINS, 2000). Podem ser usados, como características físicas, a área de drenagem da bacia, o comprimento do curso d'água principal e a densidade de drenagem. Além dessas variáveis, podem ser incluídas, também, o tempo de concentração, a altitude média da bacia e a precipitação (TASKER e STEDINGER, 1989; CPRM, 2001).

Conforme ELETÓBRÁS (1985), os dados utilizados em um estudo de regionalização podem ser classificados em:

a) Dados descritivos: estão relacionados com a escolha da região de estudo, bem como sua localização geográfica e caracterização hidrológica, geológica, geomorfológica, hidrogeológica e climatológica;

b) Dados físicos: tais dados estão associados à coleta das informações a respeito das características físicas, as quais são realizadas a partir da análise de mapas com detalhamento, ou seja, em escalas que possibilitem a coleta dos dados. Nesta etapa, também faz-se o diagnóstico da área de estudo no que se refere à disponibilidade de postos fluviométricos que contenham séries de dados consistentes; e

c) Dados hidrológicos: esses dados são levantados na etapa anterior (dados físicos), e incluem as características físicas e climáticas que serão utilizadas como variáveis explicativas na regionalização de vazões, sejam estas mínimas, máximas ou médias.

A seleção dos dados tem que se fundamentar em bacias que possuam histórico bem estruturado nas quais o regime de escoamento seja o mais próximo do natural. Alguns eventos tais como falhas intermitentes de medição podem tornar os dados impróprios. Contudo, se estas falhas forem de pequena duração, não há justificativa para a desclassificação de tal estação. Recomenda-se, neste caso, que o ano em que ocorram tais falhas seja retirado das análises dos dados (GUSTARD et al., 1992).

Nos estudos de regionalização da variável vazão, processos matemáticos e estatísticos são empregados às séries de dados históricos e também às características físicas e climáticas das bacias hidrográficas que mais afetam na sua distribuição espacial e que sejam de fácil aquisição e, portanto, independentemente da continuidade geográfica (FRANCHINI; SUPPO, 1996).

Thomas e Benson (1970) analisaram um grande número de características, das quais podem ser destacadas: área de drenagem, comprimento do rio principal, declividade do rio principal, armazenamento superficial, elevação, área arborizada, índices físicos do solo, largura da bacia, área de aluvião, proporção de meandro, proporção de bifurcação, largura do vale, precipitação média anual, precipitação média mensal, neve, intensidade de precipitação, evaporação média anual e temperatura.

Em relação à regionalização do escoamento médio e do volume superficial, Vorst e Bell (1981) identificaram apenas três variáveis físicas significativas para explicar as vazões, são elas: a área da bacia para a previsão do volume superficial escoado; o comprimento do curso

d'água principal e a declividade para obtenção de hidrogramas. Foi observado que a correlação entre o comprimento do curso d'água e a área é geralmente alta e, da mesma forma, a declividade também possui alta correlação com o comprimento e com a área de drenagem. Por outro lado, isto somente é verdade quando as outras variáveis que caracterizam a vazão não apresentam grande variabilidade espacial dentro da região em estudo.

Tucci e Genz (1997) mostraram que a precipitação anual é fundamental para representar as vazões no rio Alto Paraguai devido ao alto gradiente de precipitação. A mesma condição foi observada por CPRM (2001) nas bacias costeiras do Nordeste do Brasil devido ao fortíssimo gradiente de precipitação entre o semi-árido e a costa.

Em um estudo de regionalização de vazões mínimas para o Estado de Louisiana, nos Estados Unidos, Wright e Ensminger (2004) consideraram a área de drenagem, a declividade do canal principal e a precipitação média anual, como sendo as características físicas e climáticas mais importantes.

Ramech et al., (2003) sugeriram, em estudo de regionalização de vazões de algumas sub-bacias do rio São Francisco, que além das variáveis físico-climáticas usualmente utilizadas em estudos de regionalização de vazões, a inserção de uma variável que representasse a permeabilidade do solo era importante. A inclusão dessa variável melhorou significativamente o desempenho dos modelos. Desta forma, os autores chegaram à premissa de que a inserção de variáveis explicativas relacionadas com o processo de formação das vazões nos cursos d'água é relevante para estudos de regionalização.

IGAM (2012) desenvolveu um estudo de regionalização de vazões para o aperfeiçoamento do processo de outorga no estado de Minas Gerais e a única variável explicativa utilizada foi a área de drenagem da bacia. Foram eliminadas variáveis como o comprimento do rio principal e a densidade de drenagem, pois estas mostraram baixa interferência no processo de geração de vazões mínimas e médias.

3.2.2. Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

O termo regiões homogêneas está relacionado a extensões que possuem similaridade hidrológica. Tal similaridade inclui elementos físicos, climáticos, biológicos, geológicos e efeitos antrópicos. Devido à grande complexidade na consideração de todos esses fatores, Lanna (2004) definiu região homogênea como uma região na qual diversas características climáticas e fisiográficas teriam variabilidade mínima. A similaridade, nesse caso, seria examinada em relação aos fenômenos de maior interesse no processo hidrológico em estudo.

Bobée e Rasmussen (1995) admitiram que, a demarcação de regiões homogêneas é construída com base em premissas difíceis de serem tratadas com rigor matemático, e de acordo com Hosking e Wallis (1997), usualmente a determinação das regiões homogêneas é muito subjetiva.

Ainda, segundo Hosking e Wallis (1997), os métodos para a definição de regiões homogêneas podem ser agrupados em quatro segmentos, os quais são:

- a) Conveniência Geográfica: são frequentemente selecionadas com base em áreas administrativas, com intuito de formarem um conjunto de locais contíguos;
- b) Agrupamento subjetivo: normalmente é empregado em estudos de pequenas escalas. A delimitação da região homogênea é feita de forma subjetiva, com base na similaridade de características do local, tais como, relevo, classificação climática dentre outras;
- c) Agrupamento objetivo: agrupa-se os postos em um ou mais conjuntos, de modo que uma dada estatística não supere um valor limite previamente escolhido. Esses limites são escolhidos de modo que minimize a heterogeneidade dentro do grupo; e
- d) Análise de clusters: é um método de análise estatística multivariada, no qual um vetor de dados é associado a cada local; os locais podem ser divididos ou reunidos em grupos de acordo com a similaridade de seus vetores de dados.

Com o passar dos anos, desenvolveram-se inúmeros métodos de regionalização. Naghettini e Pinto (2007) citam três tipos de procedimentos de análise regional: métodos que regionalizam os quantis associados a um risco específico, métodos que regionalizam os parâmetros das distribuições de probabilidades e métodos que regionalizam uma curva de quantis adimensionais, geralmente denominados de métodos Index-Flood ou métodos da cheia-índice. Dos três métodos de regionalização comentados, apenas o primeiro não carece da determinação de regiões homogêneas do ponto de vista estatístico, ou seja, mesma distribuição de probabilidades para cada região hidrológica (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

3.2.3. Ajuste do modelo de regionalização hidrológica

Muitas técnicas de regionalização são conhecidas no meio científico, porém os mais comumente utilizados envolvem a construção de modelos empíricos de regressão que relacionam a vazão de interesse e medidas geográficas e/ou climatológicas da bacia (GAN et al., 1990; RIGGS, 1990).

O aperfeiçoamento dos métodos de regionalização possui papel importante no planejamento e na gestão dos recursos hídricos, uma vez que estes contribuem para a melhora

das estimativas das vazões nos cursos d'água e garantem maior confiabilidade e segurança na utilização dos modelos de regressão (PRUSKI et al., 2013).

Pinto (2006) analisou os métodos de regionalização de vazões mínimas da curva de permanência de vazões para a bacia do rio das Velhas, por intermédio dos métodos Tucci (2000) (curva de permanência de longo termo) e o de Claps e Fiorentino (1997). O estudo constatou que ambos os métodos forneceram resultados satisfatórios, e que o modelo estimado apresentou um bom desempenho.

Chaves et al. (2002) propuseram um método para regionalização de vazões mínimas, por intermédio da interpolação e a extrapolação automática, em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). O estudo foi realizado na bacia do rio Itapicuru, localizada no Estado da Bahia, com baixa densidade de postos hidrométricos. A metodologia proposta por esses autores proporcionou erros relativos médios de 45,1% contra 289,7% do método tradicional (curva adimensional).

Em contrapartida, Azevedo (2004) analisou a regionalização de vazões mínimas de referência para a sub bacia do rio Paraná (entre os estados de Tocantins e Goiás), este avaliou três metodologias: a descrita pela ELETROBRÁS (1985), a de Chaves et al. (2002), e a baseada na interpolação linear de vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}). O autor verificou que a melhor metodologia foi a tradicional, que utiliza como base as equações de regressão regionais. Enfatizou, assim, a importância de se avaliar a metodologia aplicada, devido a peculiaridade de diferentes bacias.

Dawdy et al. (2012) relataram que, apesar de diversas melhorias introduzidas na análise de frequência regional de vazões, elas ainda permanecem restritas, na medida em que não incluem nenhum conhecimento dos processos físicos que produzem as vazões.

Wolff et al. (2014) propuseram um novo modelo de regionalização de vazões para o Estado de São Paulo, o qual não é dependente da inserção da precipitação média anual para efetuar os cálculos e não é vinculado à determinação de regiões hidrologicamente homogêneas. O modelo proposto neste estudo apresenta-se com desempenho pouco superior ao de Liazzi et al. (1988), de acordo como índice de confiança (c), (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

3.3. O direito do uso da água

A Lei nº 9433/97 (BRASIL, 1997), que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH), proporciona princípios fundamentais para a gestão das águas, pois considera,

dentre outros, os fundamentos da participação e descentralização na tomada de decisões. Tal Lei estabelece que a água é um bem público e elege os planos de recursos hídricos como um dos instrumentos para a implementação da PNRH. Dentre os instrumentos determinados pela PNRH, a outorga dos direitos de uso da água assume como escopo dar suporte ao gerenciamento do recurso hídrico, posto que, atribui ao usuário o quanto possa derivar, determinando volumes de água para atender suas necessidades. Para a instrução de um processo de outorga, é necessária a confrontação de duas grandezas: a disponibilidade hídrica (oferta) e a demanda. A demanda pode ser avaliada a partir do cadastramento de usuários, dinâmico e contínuo no tempo. A disponibilidade hídrica varia com o tempo e no espaço, e é estimada a partir da avaliação do regime hidrológico da bacia. Esta é a informação basal de apoio à decisão e possui diversas explicações, função de particularidades ambientais, sociais, jurídicas e econômicas de cada região.

Segundo Ribeiro (2000) e Câmara (2003), a vazão mínima de referência é o valor de vazão que representa o critério do limite superior de utilização da água em curso d'água. A aplicação deste critério, para Harris et al. (2000), reflete um procedimento apropriado à proteção dos rios, uma vez que as alocações para derivações são realizadas, de modo geral, a partir de uma vazão de base de pequeno risco.

Cada estado do Brasil adota critérios específicos para a determinação das vazões mínimas de referência para a concessão de outorga, sem, no entanto, demonstrar explicações para a adoção desses valores (CRUZ, 2001).

A vazão mínima representa a disponibilidade natural ao longo da hidrografia e é caracterizada pela magnitude, duração e frequência (SMAKHTIN, 2001). No que diz respeito ao aspecto qualitativo da água, a vazão mínima é aplicada para determinar, por exemplo, a permissibilidade da descarga de efluentes (BARI e SADEK, 2002). Em termos quantitativos, a vazão mínima é aplicada em projetos de concessão do uso d'água, como por exemplo, em projetos de irrigação, abastecimento urbano e transposição (TSAKIRIS et al., 2011).

3.4. Vazão outorgável e vazão de referência

As vazões de referência utilizadas, segundo Cardoso da Silva e Monteiro (2004), são as vazões mínimas, de forma a caracterizar uma condição de alta garantia de água no manancial. A partir dessa condição, são realizados os cálculos de alocação da água, de modo que, quando

essas vazões mínimas ocorrem, os usuários ou os usos prioritários mantêm, de certa forma, suas retiradas de água.

De acordo com a ANA (2011), a vazão outorgável é a vazão disponível para ser outorgada. As variáveis de vazões utilizadas para outorga e gestão dos recursos hídricos são demonstradas, geralmente, pelas variáveis vazão mínima com sete dias de duração associado a um período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) ou por vazões associadas a um certo nível de permanência no tempo, como é o caso das vazões associadas a permanência de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) do tempo. A disponibilidade de informações destas variáveis ao longo da hidrografia é deficiente ou, até mesmo, inexistente (EUCLYDES et al., 1999; PANDEY e NGUYEN, 1999; SIVAPALAN et al., 2003). Nessas situações, é preciso utilizar técnicas que viabilizem a transferência de informações de locais cujo comportamento hidrológico seja semelhante ao do local de interesse.

Segundo Vogel e Fennessey (1995), a curva de permanência representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais, anuais (ou de qualquer outro intervalo de tempo) de uma determinada área de drenagem, fornecendo a porcentagem de tempo em que um determinado valor é igualado ou excedido para um determinado período de tempo. Desta curva são obtidas as vazões associadas às permanências de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}), muito utilizadas como vazões mínimas de referência para outorga de uso da água. Em alguns estados do Brasil a legislação relativa à outorga estabelece uma porcentagem da Q_{90} ou Q_{95} como referência para a concessão de outorga. A União, por exemplo, adota 70% da Q_{95} , enquanto o Distrito Federal, a Bahia e Pernambuco adotam 80% da Q_{90} como limites máximos das derivações a serem outorgadas (GARRIDO, 2003).

Os critérios adotados pelas instituições outorgantes permitem constatar que as vazões de referência utilizadas para avaliação dos pedidos de outorga, bem como os percentuais considerados outorgáveis, são bastante diversificados no País. Esse fato representa um importante desafio para a articulação entre os órgãos gestores, na prática da gestão compartilhada de bacias hidrográficas. O Quadro 1 indica os critérios adotados por alguns órgãos para a outorga de captações de águas superficiais.

Quadro 1 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Órgão gestor	Vazão máxima outorgável	Legislação referente à vazão máxima outorgável
ANA	70% da Q_{95} , podendo variar em função das peculiaridades de cada região. Até 20% para cada usuário	Não existe, em função das peculiaridades do país, podendo variar o critério
Inema-BA	80% da Q_{90} . Até 20% para cada usuário	Decreto Estadual nº 6.296/1997
SRH-CE	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 23.067/1994
Semarh-GO	70% da Q_{95}	Não existe legislação específica
IGAM-MG	30% da $Q_{7,10}$ para captações a fio d'água e em reservatórios, podem ser liberadas vazões superiores, mantendo o mínimo residual de 70% da $Q_{7,10}$ durante todo o tempo	Portarias do Igam nº 010/1998 e 007/1999
Aesa-PB	90% da Q_{90reg} . Em lagos territoriais, o limite outorgável é reduzido em 1/3	Decreto Estadual nº 19.260/1997
Ipáguas-PR	50% da Q_{95}	Decreto Estadual nº 4.646/2001
Apac-PE	Depende do risco que o requerente pode assumir	Não existe legislação específica
Semar-PI	80% da Q_{95} (rios) e 80% da Q_{90reg} (açudes)	Não existe legislação específica
Igarn-RN	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 13.283/1997

DAEE-SP	50% da $Q_{7,10}$ por bacia. Até 20% da $Q_{7,10}$ para cada usuário	Não existe legislação específica
Semarh-SE	100% da Q_{90} . Até 30% da Q_{90} para cada usuário	Não existe legislação específica
Naturatins-TO	75% Q_{90} por bacia. Até 25% da Q_{90} para cada usuário. Para barragens de regularização, 75% da vazão de referência adotada	Decreto estadual aprovado pela Câmara de outorga do Conselho Estadual de Recursos Hídricos

Fonte: Adaptado de ANA (2011).

3.4.1. Vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$)

Segundo Mendes (2007), a vazão de referência $Q_{7,10}$ se caracteriza pela mínima das médias de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos. Sobre a $Q_{7,10}$, fixou-se a duração de 7 dias para análise, sendo que esta escolha de intervalo de tempo contempla as variações críticas de consumo dos dias úteis para os demais, possibilitando a operação de reservatórios para absorver o impacto das variações durante a semana. O período de retorno de 10 anos foi escolhido por ser considerado um risco razoável, ou seja, julgou-se aceitável que em todo ano houvesse 10% de chance da vazão ficar abaixo do mínimo necessário para o suprimento urbano (ONO, 2006).

A vazão mínima com sete dias de duração é utilizada, com regularidade, como indicador da disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água. A principal vantagem do uso deste valor reside no fato de não sofrer tanta influência de erros operacionais e de intervenções humanas no curso d'água, e de ser mais minuciosa que a vazão mínima mensal (TUCCI, 2002).

O estudo realizado por Pyrce (2004) apontou um resumo de alguns usos da $Q_{7,10}$, os quais são: a) Determinação de vazão mínima/ecológica; b) Regulamentação de qualidade de descargas de águas residuárias ou alocações de resíduos (para prevenir impactos biológicos e ecológicos); c) Alocação da vida aquática, em projetos que envolvem cálculo de fluxo permanente; d) Critério de manutenção ou proteção do habitat aquático; e e) Possível indicador de mortalidade potencial da vida aquática. Segundo Wilken (1978), a Engenharia já fixou critérios de projeto para o período de retorno e para duração, como, por exemplo, para a irrigação, onde também se usa a duração de sete dias com período de dez anos.

Tanto nos Estados Unidos quanto no Brasil, a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$) é frequentemente utilizada em estudos relacionados à qualidade da água em rios (SILVA e NOVO, 1988). Singb et al. (1988), Chiang e Johnson (1976) e Flynn (2003) realizaram estudos nos rios dos estados de Illinois, Pensilvânia e New Hampshire, respectivamente. Para o primeiro trabalho, os valores da $Q_{7,10}$ foram estimados para diferentes pontos ao longo dos rios. Este estudo teve o objetivo de fornecer diretrizes para o monitoramento dos padrões de qualidade d'água no que se refere ao despejo de efluentes. Já para o segundo, os autores realizaram um estudo para avaliar a qualidade da água em alguns rios na Pensilvânia. Relataram que a qualidade da água do rio era aceitável caso o despejo de efluentes fosse inferior à $Q_{7,10}$, sendo que qualquer desvio além deste valor poderia comprometer a qualidade da água do rio. No último estudo, avaliou-se os dados de estações com 10 ou mais anos de registros de vazões, e também analisou-se o ganho do modelo com a inclusão de novas estações. Os resultados comprovaram que, em geral, a inclusão de novas estações proporcionaram maior precisão na informação da vazão mínima regional. A $Q_{7,10}$ é empregada como vazão de referência nos critérios de outorga nos estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso e Rondônia (ANA, 2005).

Em conclusão, a $Q_{7,10}$ é a menor vazão média consecutiva de sete dias que ocorreria com um período de retorno de uma vez em cada 10 anos. O cálculo da $Q_{7,10}$ é probabilístico, enquanto os da Q_{90} e da Q_{95} decorrem de uma análise de frequências (ANA, 2011).

3.4.2. Vazões de permanência em 90% e 95% (Q_{90} e Q_{95})

Q_{90} é a vazão determinada a partir das observações em um posto fluviométrico em certo período de tempo, em que em 90% daquele período as vazões foram iguais ou superiores a ela. Em outras palavras, pode-se aceitar que existe um nível de 90% de garantia de que naquela seção do curso d'água as vazões sejam maiores do que o Q_{90} . Diz-se que a Q_{90} é a vazão com 90% de permanência no tempo, podendo ser extrapolada para outras seções do curso d'água, com base na área da bacia hidrográfica contribuinte e nas quantidades de chuvas da região. Q_{95} tem o mesmo significado que a Q_{90} , entretanto a garantia corresponde a 95% do tempo de observação. Isso significa que a vazão em determinado corpo d'água é igual ou superior àquele valor em 95% do tempo. Por exemplo, se a Q_{95} de determinado rio é 10 m³/s, isso significa que durante aproximadamente 347 dias ao ano, ou seja, 95% dos dias, a vazão naquele rio é maior ou igual a 10 m³/s. Se considerarmos Q_{90} , o tempo de permanência da vazão cai de 347 (95%)

para 329 (90%) dias ao ano; assim, o valor da vazão de referência aumenta pois, a garantia de permanência daquela vazão diminui (ANA, 2011).

3.5. Caracterização das três regionalizações que serão abordadas neste trabalho

3.5.1. A regionalização de Liazi et al. (1988) para o Estado de São Paulo

A metodologia de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo proposta por Liazi et al. (1988) utilizou-se de 444 postos pluviométricos e 307 postos fluviométricos do Estado. A experiência do DAEE com o cálculo de vazões específicas em diferentes localidades do Estado permitiu que o mesmo fosse dividido em 21 regiões hidrológicamente semelhantes, classificadas de “A” a “U”.

Figura 1. 21 regiões hidrológicamente semelhantes utilizadas na Regionalização do Estado de São Paulo.

Por intermédio de ponderações e simulações, a metodologia permite avaliar a disponibilidade hídrica para qualquer curso de água pertencente ao Estado de São Paulo. O

estudo de Liazi et al. (1988) permite, também, a avaliação da disponibilidade hídrica em áreas onde a série histórica é pequena ou inexistente. A vazão média de longo período, a vazão mínima de sete dias associada a uma probabilidade de ocorrência e a curva de permanência das vazões são variáveis hidrológicas possíveis de serem estimadas por esta metodologia.

Neste método, a vazão média plurianual (m^3/s), em uma determinada seção de um curso de água, é obtida por intermédio da relação linear da vazão (Q) com a precipitação anual média da bacia hidrográfica (P):

$$Q = a + b.P \quad (01)$$

Na equação acima, a e b são parâmetros da reta de regressão, sendo que se determinou 4 retas de regressão, ou seja, 4 regiões, abrangendo as 21 regiões hidrológicamente homogêneas do Estado. A Tabela a seguir apresenta os valores das constantes para a estimativa das vazões médias (parâmetros a e b) e para a vazão mínima (A, B e C).

Tabela 1. Parâmetros regionais da Regionalização das Variáveis Hidrológicas do Estado de São Paulo segundo Liazi et al. (1988)

Região Hidrológica	Média plurianual		Valores de A e B		Parâmetro C	Valores de XT
	a	b	A	B	C	Período de retorno T= 10 anos
A	-22,14	0,0292	0,3532	0,0396	0,85	0,706
B	-29,47	0,0315	0,4174	0,0426	0,75	0,708
C	-29,47	0,0315	0,4174	0,0426	0,75	0,746
D	-22,14	0,0292	0,5734	0,0329	0,85	0,706
E	-22,14	0,0292	0,4775	0,0330	0,85	0,706
F	-26,23	0,0292	0,6434	0,2520	0,85	0,706
G	-29,47	0,0276	0,4069	0,3320	0,75	0,632
H	-29,47	0,0315	0,4951	0,0279	0,85	0,746
I	-29,47	0,0315	0,6276	0,2830	0,85	0,706
J	-29,74	0,0315	0,4741	0,0342	0,85	0,706
K	-26,23	0,0276	0,4951	0,0279	0,80	0,689
L	-26,23	0,0276	0,6537	0,0267	0,85	0,759
M	-26,23	0,0096	0,6141	0,0257	0,85	0,759
N	-26,23	0,0296	0,4119	0,0295	0,80	0,689

O	-26,23	0,0276	0,3599	0,0312	0,80	0,689
P	-26,23	0,0276	0,3599	0,0312	0,80	0,619
Q	-4,62	0,0096	0,6537	0,0267	0,85	0,633
R	-4,62	0,0096	0,6141	0,0257	0,85	0,661
S	-4,62	0,0096	0,5218	0,0284	0,80	0,661
T	-4,62	0,0096	0,4119	0,0295	0,80	0,661
U	-4,62	0,0096	0,4119	0,0295	0,80	0,594

Fonte: Adaptado de Liazi et al. (1988)

A precipitação média anual (P) utilizada no método proposto por Liazi et al. (1988), foi calculada pela média ponderada da precipitação em relação à área de drenagem, interpolada entre isoietas consecutivas (P_i), e a área de drenagem (A_i) entre essas mesmas isoietas.

$$P = \frac{\sum (A_i \cdot P_i)}{\sum A_i} \quad (02)$$

Em que, A_i é a área entre as isoietas P_i e P_{i+1} , km²; P_i é a chuva média na área A_i , obtida por interpolação entre P_i e P_{i+1} , mm.

Para a determinação da vazão média de longo período, multiplica-se o valor da vazão específica média plurianual pela sua respectiva área da bacia de contribuição.

$$Q = Q_{esp} \cdot A \quad (03)$$

Em que, Q é a vazão média de longo período (L/s); Q_{esp} é a vazão específica média plurianual, L.s⁻¹.Km², e; A é a área da bacia de contribuição em Km². Desta forma, pode-se obter a estimativa da vazão média de longo período a partir da precipitação anual média, observada no mapa de isoietas (LIAZI et al.,1988).

As vazões mínimas anuais de 7 dias consecutivos com "T" anos de período de retorno $Q_{7,T}$ (m³/s), são utilizadas como critério de disponibilidade hídrica natural em uma rede de drenagem. As vantagens do uso desse cálculo são a menor influência de interferências humanas no curso d'água e de erros operacionais do que a vazão mínima diária, além de ser mais detalhada que vazões mínimas mensais, (LIAZI et al.,1988). O período de retorno (T) a ser simulado pode ser de 10 a 100 anos, sendo que os resultados representam danos provocados por eventos hidrológicos ou que o manancial não atenderá a esta vazão, em média, uma vez em

espacial e por isso foi necessário trabalhar-se com com estações de estados vizinhos (Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná).

A partir das séries de vazões médias mensais e das áreas de drenagem das estações fluviométricas determinaram-se séries de vazões específicas médias mensais de acordo com a equação a seguir:

$$Q_{\text{esp}} = \frac{\bar{Q}_m}{A} \quad (05)$$

Em que:

Q_{esp} – vazão específica média mensal, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$

$\bar{Q}_m$ – Vazão média mensal, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e

A – Área de drenagem, Km^2 .

Com base nessas séries de vazões específicas médias reais, os autores elaboraram a curva de duração ajustando-se os dados à distribuição de probabilidade Log-normal 3P; tal função de distribuição acumulativa e inversa da Log-normal 3P é expressa pelas equações abaixo:

$$F(x) = \phi \left[\frac{\ln(x-\gamma) - \mu}{\sigma} \right] \quad (06)$$

$$x(F) = \gamma + e^{\{\mu + [\sigma \cdot \phi^{-1}(x)]\}} \quad (07)$$

Em que:

$\Phi^{-1}(x)$ – Inverso da distribuição acumulativa normal associada a uma probabilidade;

σ – Parâmetro de escala;

γ – Parâmetro de escala;

μ – Parâmetro de forma, e;

$x(F)$ – Valor da amostra relacionada a permanência no tempo.

Desse modo, por intermédio dos parâmetros descritos acima, foi possível representar, para cada bacia hidrográfica, suas características físicas e fluviométricas.

A interpolação destes parâmetros foi realizada pelo modelo de interpolador inverso do quadrado da distância (Equação 08), o qual desconsidera o padrão de dependência espacial segundo Silva et al., (2008):

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (08)$$

Em que:

X_p – Variável interpolada;

X_i – Valor da variável da i-ésima localidade vizinha; e

d_i – Distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

A proposta de Wolff et al., (2014) calcula o volume a ser regularizado por um reservatório e as vazões de referência para emissão de outorga no Estado de São Paulo. O mesmo foi ajustado às equações a seguir.

Ao substituir a Equação (05) na Equação (07), e considerando que o inverso da distribuição acumulativa normal é associado a uma série crescente, ou seja, refere-se à ocorrência de um evento ser menor ou igual a uma probabilidade p , subtraiu-se 1 da probabilidade de igualdade ou superação da vazão de permanência a ser determinada. Portanto, as vazões de permanência foram calculadas de acordo com a Equação (09), sendo essa, dependente da área da bacia de drenagem, dos parâmetros da distribuição de probabilidade Log-normal 3P e da probabilidade de permanência (WOLFF, 2013).

$$Q_p = \{ \gamma + e^{\{ \mu + [\sigma \cdot \Phi^{-1}(1-p)] \}} \}. A \quad (09)$$

Sendo:

σ – Parâmetro de escala;

γ – Parâmetro de escala;

μ – Parâmetro de forma;

$\Phi^{-1}(1-p)$ – Inverso da distribuição acumulativa normal associada à probabilidade $(1-p)$;

A – Área da bacia de drenagem, Km^2 , e

Q_p – Vazão de permanência, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Para a determinação da equação que estima a $Q_{7,10}$, os autores levaram em consideração a alta correlação positiva da mesma com as vazões de permanência, por isso a Equação (10) foi

desenvolvida relacionando as vazões mínimas $Q_{7,10}$ com as vazões de 98% de permanência no tempo (Q_{98}).

$$Q_{7,10} = 0,829.Q_{98} \quad (10)$$

O procedimento realizado para o cálculo da vazão média de longo período nesse método consiste em determinar a área sob a curva de permanência e dividir esse valor por 100. De forma simplificada esse procedimento pode ser representado pela seguinte equação:

$$\bar{Q} = 0,025(\bar{Q}_0 + \bar{Q}_{100}) + 0,05(Q_5 + Q_{95}) + 0,075(Q_{10} + Q_{90}) + 0,1(Q_{20} + Q_{30} + Q_{40} + Q_{50} + Q_{60} + Q_{70} + Q_{80}) \quad (11)$$

Em que: $\bar{Q}$ – Vazão média de longo período, Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{30} , Q_{40} , Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} , Q_{80} , Q_{90} e Q_{95} são as vazões de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 95% de permanência; $\bar{Q}_0$ é uma vazão próxima de 0% de permanência (qualquer valor inferior a 5%) e $\bar{Q}_{100}$ é uma vazão próxima de 100% de permanência (qualquer nível superior a 95%).

3.5.3. A regionalização do Estado de Minas Gerais (IGAM, 2012)

A metodologia de regionalização hidrológica do Estado de Minas Gerais utilizou-se de 598 postos pluviométricos e 392 postos fluviométricos. O estudo de regionalização envolveu para cada Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) (Figura 3) a identificação de regiões hidrológicamente homogêneas, a seleção da melhor variável explicativa e a identificação do melhor modelo representativo. As variáveis explicativas área e precipitação efetiva apresentaram os melhores ajustes estatísticos para cada região hidrológicamente homogênea no estudo e que foi, portanto, o modelo selecionado para representar a variável de interesse (vazão).

Figura 3. Divisão das Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos – UPGRHs do Estado de Minas Gerais. Fonte: (IGAM, 2012).

A região estudada neste trabalho pertence a UPGRH PJ1 (Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba/Jaguari), a qual está localizada ao extremo sul do Estado de Minas Gerais, e é composta pelos municípios de Extrema, Camanducaia, Toledo, Itapeva e Sapucaí-Mirim. Sua área de drenagem possui ao todo 1.366,00 Km².

No estudo foram analisados os dados consistidos de nove estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da ANA. O período-base foi selecionado para que as estações fluviométricas tivessem no mínimo 20 anos de dados e uma série histórica com mais de 95% dos dados, sendo definido o período de 1968 a 2003.

Tendo em vista a falta do detalhamento da hidrografia para as áreas situadas fora do Estado de Minas Gerais, a única variável explicativa que pode ser usada nesta bacia foi a de área de drenagem.

No método de regionalização proposto por IGAM (2012), a determinação das equações estimadoras de vazões de referência foi realizada a partir da análise de indicadores estatísticos de cinco modelos disponíveis no *software* SisCoRV 1.0, São eles: modelo linear, modelo potencial, modelo exponencial, modelo logarítmico e modelo recíproco.

A equação selecionada para a estimativa da vazão média de longo período ($\bar{Q}$) na região da UPGRH PJ1 é:

$$\bar{Q} = 0,0137052543696619.A^{0,978914817862879} \quad (12)$$

Nas regiões onde a $\bar{Q}$ específica superou o máximo coeficiente observado nas estações fluviométricas pertencentes à região hidrologicamente homogênea foi realizado um ajuste, diminuindo a $\bar{Q}$ nesses locais para um valor igual ao produto da área de drenagem pelo valor de $\bar{Q}$ específica imposto. O valor de $\bar{Q}$ específica de imposição foi de 0,01370 e a equação de ajuste aplicada nas regiões de imposição foi:

$$\bar{Q} = 0,013695178.A \quad (13)$$

A equação selecionada para representar a $Q_{7,10}$ na região homogênea foi:

$$Q_{7,10} = 0,000903883710440749.A^{1,10051287017873} \quad (14)$$

O valor de $Q_{7,10}$ específica de imposição foi de 0,003146; no entanto, não foi necessária a imposição do valor limite de vazão específica, pois a $Q_{7,10}$ específica regionalizada foi inferior ao valor imposto em todos os trechos da hidrografia.

A equação selecionada para representar a Q_{95} na região homogênea foi:

$$Q_{95} = 0,00257078043609339.A^{1,01526958017455} \quad (15)$$

O valor de Q_{95} específica de imposição foi de 0,004230; no entanto, não foi necessária a imposição do valor limite de vazão específica, pois a Q_{95} específica regionalizada foi menor que o valor imposto em todos os trechos da hidrografia.

A equação selecionada para representar a Q_{90} na região homogênea foi:

$$Q_{90} = 0,00377364701077851.A^{0,992664330413998} \quad (16)$$

O valor de Q_{90} específica de imposição foi de 0,005107, mas não foi necessária a imposição do valor limite de vazão específica, pois a Q_{90} específica regionalizada foi menor que o valor imposto em todos os trechos da hidrografia.

3.5.4. O Sistema Cantareira e a região do Alto do Rio Jaguari

O Sistema Cantareira é um dos maiores sistemas de abastecimento público do mundo. Com uma área produtora de água de aproximadamente 227.950 hectares, produz em média 33 mil litros por segundo, dos quais 31 são produzidos na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba e apenas dois são produzidos na Bacia do Alto Tietê, pelo rio Juquery. Dos 31 mil litros por segundo produzidos na Bacia do Piracicaba, 22 vêm dos reservatórios Jaguari-Jacaré, cujas bacias estão inseridas majoritariamente no Estado de Minas Gerais (WHATELY e CUNHA, 2007).

A área de drenagem do rio Jaguari, à montante da represa, dentro do Sistema Cantareira, abrange 103.243,4 hectares. Suas nascentes estão localizadas no sul do Estado de Minas Gerais, nos municípios de Camanducaia, Extrema, Itapeva e Toledo. Em Extrema, o rio Jaguari recebe um afluente importante, o rio Camanducaia Mineiro. Alguns quilômetros abaixo da referida confluência, já dentro do Estado de São Paulo, o rio Jaguari é represado, constituindo um dos reservatórios do Sistema Cantareira. A jusante do reservatório, já fora do Sistema Cantareira, se inicia no município de Americana (SP) o rio Piracicaba, pela junção dos rios Jaguari e Atibaia, seguindo depois até o município de Barra Bonita (SP), onde se une ao rio Tietê. Como a bacia do Jaguari abrange quatro municípios mineiros e quinze paulistas, ela é considerada Federal (WHATELY e CUNHA, 2007).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, o qual se localiza na divisa dos Estados de Minas Gerais e São Paulo (Figura 4). Essa Bacia Hidrográfica abrange cerca de 55 municípios, dos quais 10 pertencem à Minas Gerais e 45 estão localizados em São Paulo.

Figura 4. Região de estudo do trabalho.

Essa área está inserida nas Sub-bacias do Rio Tietê e pertence a Bacia Hidrográfica do Rio Paraná. A região da cabeceira é conhecida como Alto do Rio Jaguari e possui papel estratégico para o Sistema Cantareira, uma vez que, dos 33 mil litros por segundo totais produzidos em média pelo sistema, 31 são produzidos na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, sendo que 22 são oriundos dos reservatórios Jaguari-Jacareí, cujas bacias estão inseridas majoritariamente no Estado de Minas Gerais.

4.1.1. O trecho paulista

O relevo do trecho paulista faz parte do Planalto Atlântico, que corresponde a uma região de terras altas constituídas predominantemente por rochas cristalinas pré-cambrianas, sendo representadas pelas zonas da Serrania de São Roque, Planalto de Jundiá e Serrania de Lindóia, além de uma pequena porção da Serra da Mantiqueira. Estas quatro zonas constituem áreas acidentadas compostas por relevo montanhoso e de morros, cujas altitudes chegam a superar 1.200 m e cujos assoalhos de seus vales oscilam predominantemente entre 750 m e 850 m, sendo drenadas pelas Sub-Bacias dos Rios Camanducaia, Atibaia, Jaguari e Jundiá (PLANO DE BACIAS PCJ, 2010).

Segundo Oliveira et al. (1999), os principais tipos de solo encontrados no trecho paulista são: Latossolo Vermelho Amarelo do tipo distrófico; Latossolo Vermelho; Gleissolo Háptico distrófico e eutrófico; Argissolo Vermelho-Amarelo; Cambissolo Háptico; Planossolo Háptico; Neossolo Litólico; Neossolo Quartzarênico e Nitossolo Vermelho.

De modo geral, o clima é do tipo de quente a temperado e chuvoso. O período chuvoso ocorre entre os meses outubro e abril, e o de estiagem entre maio e setembro. Os índices de precipitação pluviométrica, na média, variam entre 1200 e 1800 mm anuais. Entretanto, nos trechos das cabeceiras dos cursos formadores do rio Piracicaba, na região da Mantiqueira, a leste de Bragança Paulista, ocorrem as maiores precipitações pluviométricas, cujos índices superam os 2000 mm anuais. Esses índices caem para 1400 mm e 1200 mm nos cursos médio e baixo do Piracicaba, respectivamente (PLANO DE BACIAS PCJ, 2010).

4.1.2. O trecho mineiro

Entre as formações geológicas mais perceptíveis cita-se o relevo que abrange a serra de Itapeva, com altitudes em torno de 1400 m (máxima de 1475 m). A Serra das Antas, localizada a sudeste de Camanducaia, atinge cotas altimétricas em torno de 1650 m. O Rio Jaguari passa a sudeste desta serra, em cotas altimétricas em torno de 1280 m (PLANO DE BACIAS PCJ, 2010).

Há três grandes grupos de solos encontrados no trecho mineiro (Latossolos, Argissolos e Cambissolos), alternando-se nas superfícies mais elevadas de acordo com o relevo, sendo que solos aluviais aparecem nas planícies dos rios e córregos (IRRIGART, 2005).

A lâmina média anual de chuvas precipitadas sobre o trecho mineiro é, em geral, maior que o equivalente a 1500 mm. A evaporação potencial anual varia entre 650 e 800 mm. A região enquadra-se, segundo Nimer (1989), em dois domínios climáticos: o do clima Mesotérmico

Brando Úmido e Superúmido e o do clima Mesotérmico Médio Superúmido. O clima Mesotérmico Brando aparece acima da cota altimétrica de 900 m. Nessas áreas o verão é brando e o mês mais quente acusa média inferior a 22°C, predominando médias entre 20°C e 18°C. O inverno é bastante sensível, possuindo pelo menos um mês com temperatura média inferior a 15°C. O clima Mesotérmico Médio atua nas superfícies mais elevadas da Mantiqueira, onde o predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano se dá devido principalmente à orografia; ocorre, portanto, acima das cotas altimétricas de 1600 metros. Nessas restritas áreas, a média de temperatura dos meses mais quentes é inferior a 17°C e a média anual é das mais baixas do Brasil, inferior a 14°C, com pelo menos um mês com temperatura média inferior a 10°C. Levando-se em consideração o regime pluviométrico, a região constitui domínio de clima de superúmido a úmido, sendo os níveis mais elevados da Mantiqueira sujeitos às maiores taxas de precipitação e de umidade atmosférica, atribuídos o caráter superúmido, e as demais áreas com o clima úmido, caracterizado por uma curta e pouco sensível estação seca no inverno, com um a dois meses secos.

4.1.3. Estações fluviométricas

As informações das estações fluviométricas foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH, ambos pertencentes às plataformas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

O software SisCAH 1.0, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (SOUSA et al., 2009), foi utilizado para a triagem e processamento inicial dos dados consistidos, assim como para a obtenção das curvas de permanência e das vazões Q_{90} , Q_{95} .

A etapa inicial do estudo consistiu na identificação de estações fluviométricas as quais estão dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari. Inicialmente foram identificadas 30 estações operantes, em seguida foi realizada uma filtragem dos postos que se localizam a montante do reservatório Jaguari/Jacareí, uma vez que os postos a jusante do mesmo podem sofrer influência do efeito regularizador que os reservatórios exercem sobre a vazão natural de um curso de água. Por final selecionaram-se aqueles postos que possuíam 20 anos completos de dados com uma tolerância máxima de 5% de falhas. A Tabela 2 e a Figura 5 apresentam as cinco estações que se adequaram aos critérios citados e por consequência foram analisadas neste estudo.

Tabela 2. Estações Fluviométricas estudadas

Código	Município	Estado	Rio	Sub-Bacia
62625000	Amparo	SP	Camanducaia	Rio Jaguari
62590000	Extrema	MG	Jaguari	Rio Jaguari
3D-001	Jaguariúna	SP	Camanducaia	Rio Jaguari
62620000	Monte Alegre do Sul	SP	Camanducaia	Rio Jaguari
62622000	Monte Alegre do Sul	SP	Camanducaia	Rio Jaguari

Figura 5. Localização dos postos fluviométricos utilizados no estudo.

Tais estações possuem dados que variam entre os anos de 1939 a 2017. Para a definição do período histórico e obtenção das curvas de permanência, este trabalho considerou todos os anos com dados completos disponíveis, sem que um período base comum fosse predefinido a todas as estações, descartando-se os anos com registros incompletos ou inexistentes. Essa forma de calcular a curva, conforme descrito por Cruz (2001), é identificada como método toda série e possibilita a obtenção de uma única curva de permanência, denominada curva de permanência empírica total, com probabilidade de ocorrência das vazões em relação ao período da amostra.

Segundo Kang (2013), a melhor solução para os dados faltantes é maximizar a coleta de dados quando o protocolo do estudo é projetado. A aplicação de técnicas sofisticadas de análise estatística só deve ser realizada após os esforços máximos terem sido empregados para reduzir o efeito de dados faltantes.

4.1.4. Delimitação da área de drenagem e cálculo da precipitação média anual das Bacias compreendidas pelos postos fluviométricos

A delimitação da bacia de drenagem das estações fluviométricas e o cálculo da precipitação média anual das mesmas foi realizada na plataforma ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014).

O modelo digital de elevação ASTER GDEM foi utilizado para a delimitação da bacia de drenagem; esse produto possui cerca de 30 metros de resolução espacial e foi viabilizado por intermédio de uma parceria entre a NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI). Os modelos digitais de elevação foram construídos a partir de pares estereoscópicos de imagens oriundas da plataforma EOS AM-1 com o instrumento ASTER, sensor VNIR (ABRANS et al., 1999). Os dados digitais são disponibilizados pela USGS (*United States Geological Survey*).

O download das cenas utilizadas foi realizado no portal *Earth Explorer*; tais imagens foram unidas em uma única, desta forma, obtiveram-se valores médios de altitude para a Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari.

A partir desse mosaico e com o auxílio da ferramenta *Arc Hydro*, que é um conjunto de modelos de dados e ferramentas que opera dentro do ArcGIS, delimitaram-se as bacias de drenagem das respectivas estações fluviométricas.

Em seguida foi determinada a precipitação anual média das bacias compreendidas pelas estações fluviométricas, uma vez que esta é uma variável dependente no método de regionalização proposto por Liazi et al. (1988). Para tanto, calculou-se a média ponderada da precipitação em relação a área de drenagem, interpolada entre duas isoietas consecutivas (Equação 17). O mapa de isoietas utilizado para tal encontra-se a seguir.

$$P = \frac{\sum(A_i \cdot P_i)}{\sum A_i} \quad (17)$$

O mapa de isoietas abaixo foi apresentado por Braga Jr. et al. (1991); o mesmo foi construído em escala 1:1.000.000 e o traçado das isoietas baseou-se nas séries históricas dos totais anuais precipitados em 444 estações pluviométricas existentes na época.

Figura 6. Mapa de isoietas do estado de São Paulo. Fonte: (BRAGA JR et al., 1991).

O Método de Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo (Liazi et al., 1988) também basou-se nessas 444 estações pluviométricas, e por essa razão optou-se por utilizar o mapa de isoietas supracitado.

O mapa em questão foi georreferenciado e a área correspondente a área de estudo foi vetorizada no software ArcGIS 10.2.2. para a determinação da precipitação média anual. Aplicou-se a Equação 2 para o cálculo da média ponderada entre isoietas.

4.2. Cálculo das vazões de referência por intermédio das estações fluviométricas

Após a organização dos dados de vazão, foram realizados os cálculos das vazões de referência a serem analisadas, quais sejam: Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} , $Q_{7,10}$. As séries de vazão utilizadas neste trabalho não apresentaram períodos comuns, uma vez que de acordo com Hosking e

Wallis (1997), se as séries são homogêneas e representativas da variável em análise, o uso dessa prática é desnecessário.

4.2.1. Curva de permanência e cálculo da Q_{90} , Q_{95} , Q_{med}

A curva de permanência para obtenção das vazões Q_{90} e Q_{95} foi calculada pelo método da série completa de dados, a qual utiliza todos os anos disponíveis na série de dados, que, segundo Cruz e Tucci (2008), possibilita a obtenção da curva de permanência empírica total. Para isso, foi utilizado o software SisCAH 1.0, que segue a metodologia descrita por Vogel e Fennessey (1995), no qual as vazões são ordenadas de forma decrescente em classes de acordo com a sua magnitude e associadas às frequências empíricas de não superação.

No SisCAH, o procedimento disponível para a obtenção da curva de permanência para cada estação fluviométrica é o baseado na obtenção de classes de frequência e segue os seguintes passos:

- Seleção da série de dados de vazões diárias a ser utilizada para a obtenção da curva;
- Definição de 50 intervalos de classe das vazões diárias;
- Subdivisão dos intervalos de classe com base na escala logarítmica devido à grande variação de magnitude das vazões envolvidas;
- Cálculo do intervalo de classe (ΔX) pela equação:

$$\Delta X = \frac{[\ln(Q_{max}) - \ln(Q_{min})]}{50} \quad (18)$$

Em que:

Q_{max} – vazão máxima da série; e

Q_{min} – vazão mínima da série.

- Cálculo dos limites dos intervalos, a partir de Q_{min} , adicionando o intervalo calculado anteriormente, o que resulta na vazão do limite superior do intervalo i:

$$Q_{i+1} = \exp[\ln(Q_i) + \Delta X] \quad (19)$$

- Determinação, com base nos dados de vazão da série histórica de cada estação fluviométrica, do número de vazões classificadas em cada intervalo;
- Determinação da frequência (f_i) associada ao limite inferior de cada intervalo:

$$f_i = \frac{N_{qi}}{NT} 100 \quad (20)$$

Em que:

N_{qi} – Número de vazões de cada intervalo; e

NT – Número total de vazões.

- Obtenção da curva de permanência plotando-se na ordenada os limites inferiores dos intervalos de classe de vazão e na abscissa a frequência de ocorrência.

Essas frequências são acumuladas e assim, com a obtenção da curva de permanência, é extraído o valor da vazão com 90% de permanência (Q_{90}) e com 95% de permanência (Q_{95}).

A determinação da vazão média de longo período (Q_{med}) consistiu no cálculo da média aritmética das vazões apresentadas em cada série histórica, a mesma foi calculada utilizando o software SisCAH 1.0.

4.2.2. Cálculo da $Q_{7,10}$

Para estimar as vazões máximas e mínimas utilizando diferentes períodos de retorno é necessário gerar funções de distribuição de densidade de probabilidade. Essas funções são geradas a partir de dados de eventos máximos no caso de se estimar vazões máximas, e a partir de dados de eventos mínimos no caso da estimativa de vazões mínimas, a qual é utilizada para determinação da $Q_{7,10}$.

Além da estimativa das vazões, utilizam-se intervalos de confiança para estabelecer a variação possível dos eventos estimados. A metodologia de estimativa das funções de probabilidade e da obtenção do intervalo de confiança utilizadas nesse trabalho estão descritas a seguir; tais procedimentos foram realizados pelo software SisCAH 1.0.

Para as distribuições de frequência utilizadas, a estimativa da magnitude de um evento com determinado período de retorno foi dada pela equação:

$$M = \mu + K \sigma \quad (21)$$

Em que:

- M – Magnitude do evento para o período de retorno estabelecido;
- μ – Média dos eventos;
- K – Fator de frequência; e
- σ – Desvio padrão dos eventos.

O valor do fator de frequência pode ser obtido conforme as funções de distribuição de frequência contempladas no aplicativo SisCAH 1.0 pelos procedimentos descritos na sequência. São eles:

4.2.2.1 Distribuição Log-Normal tipo II:

Conforme Kite (1988), para a série gerada a partir dos logaritmos dos eventos da série de dados, o fator de frequência é calculado da seguinte forma:

$$K = \frac{\left(e^{\sqrt{\ln(z^2+1)}} \cdot T - \frac{\ln(z^2+1)}{2} \right) - 1}{z} \quad (22)$$

Em que:

$$z = \frac{\sigma}{\mu} \quad (23)$$

Sendo:

- T – Período de retorno;
- σ – Desvio padrão dos eventos da amostra; e
- μ – Média dos eventos da amostra.

4.2.2.2 Distribuição Log-Normal tipo III:

Segundo Kite (1988), para a série gerada a partir dos logaritmos dos eventos da série de dados, o fator de frequência é calculado da seguinte forma:

$$K = \frac{\left(e^{\sqrt{\ln(z^2+1)}} \cdot D - \frac{\ln(z^2+1)}{2} \right) - 1}{\sqrt{(e^{\ln(z^2+1)}) - 1}} \quad (24)$$

Em que:

$$K = \frac{\left(e^{\sqrt{\ln(z^2+1)}} \cdot T - \frac{\ln(z^2+1)}{2} \right) - 1}{W} \quad (25)$$

Sendo:

$$W = \frac{1 - \omega^{\frac{2}{3}}}{\omega^{\frac{1}{3}}} \quad (26)$$

$$\omega = \frac{-y + \sqrt{y^2 + 4}}{2} \quad (27)$$

$$y = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \right) \quad (28)$$

Em que:

T – Período de retorno;

σ – Desvio padrão dos eventos da amostra;

μ – Média dos eventos da amostra;

y – Assimetria; e

N – Número de eventos.

4.2.2.3 Distribuição de Pearson tipo III:

É também conhecida como Distribuição Gama Tipo III. Segundo Kite (1988), o fator de frequência é calculado da seguinte forma:

$$K = D + (D^2 - 1) \frac{y}{6} + \frac{1}{3} (D - 6D) \left(\frac{y}{6} \right)^2 - (D^2 - 1) \left(\frac{y}{6} \right)^3 + D \left(\frac{y}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{y}{6} \right)^5 \quad (29)$$

Sendo:

$$D = \frac{2,30753 + 0,27061.t}{1 + 0,99229.t + 0,04481.t^2} \quad (30)$$

Em que:

- D – Desvio padrão padronizado;
- y – Assimetria;
- T – Período de retorno;
- N – Número de eventos da amostra;
- xi – i-ésimo evento da amostra;
- μ – Média dos eventos; e
- σ – Desvio padrão.

4.2.2.4 Distribuição Log-Pearson tipo III:

É também conhecida como Distribuição Log-Gama Tipo III. De acordo com Kite (1988), para a série gerada a partir dos logaritmos dos eventos da série de dados, o fator de frequência é calculado segundo a Equação 31.

4.2.2.5 Distribuição Weibull:

Recomendada para série de eventos mínimos, seu fator de frequência é dado, conforme Kite (1988), por:

$$K = A_{\alpha} + B_{\alpha} \left(\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right) \quad (31)$$

Sendo:

$$\alpha = \frac{1}{0,2777757913 + 0,3132617714y + 0,0575670910y^2 - 0,0013038566y^3 - 0,0081523408y^4} \quad (32)$$

4.2.2.6 Intervalo de confiança:

É utilizado no SisCAH 1.0, em nível de confiança de 95%, e segundo Kite (1988), a estimativa dos limites do intervalo é dada por:

$$M - 1,96 \times \delta < \beta < M + 1,96 \times \delta \quad (33)$$

Em que:

M – Magnitude do evento;

δ – Erro padrão pertinente a cada função de probabilidade; e

β – Intervalo de confiança em nível de probabilidade de 95%.

O teste de aderência utilizado para escolher a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou às Q_7 foi o de Kolmogorov-Smirnov. Tal procedimento também foi realizado no software SisCAH 1.0.

4.3. Cálculo das vazões de referência por intermédio dos diferentes modelos de regionalização hidrológica

4.3.1. Modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo

De posse da precipitação anual média, da área de drenagem das Bacias Hidrográficas e a partir das fórmulas e coeficientes propostos por Liazi et al. (1988), foram calculadas as vazões Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ em uma planilha eletrônica. As equações propostas por esse método estão descritas no item 3.5.1. deste trabalho (Equações de 1 a 4).

4.3.2. Modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo – Nova Proposta

A nova proposta de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo foi sugerida por Wolff et al. (2014). O cálculo da Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ tendo como base os coeficientes propostos por estes autores, foi realizado por um aplicativo desenvolvido por Wolff e Liz (2013). Tal aplicativo pode ser acessado pelo seguinte endereço eletrônico: <http://www.leb.esalq.usp.br/wolff/rv/>. Nessa plataforma são necessários como dados de entrada as coordenadas da bacia e a área de abrangência da bacia hidrográfica em questão. A plataforma aceita como dados de entrada coordenadas posicionadas fora do estado de São Paulo. Portanto, não foi necessária a programação de planilhas eletrônicas para o cálculo das vazões em estudo de estações fluviométricas mineiras, ao se utilizar este procedimento.

4.3.3. Modelo de regionalização hidrológica do Estado de Minas Gerais

De posse de informações referentes à área de drenagem das bacias, foram programadas planilhas eletrônicas para cálculo das vazões Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ conforme proposto por IGAM (2012). As equações propostas por esse método estão descritas no item 3.5.3. deste trabalho (Equações de 12 a 16).

4.4. Análise estatística dos modelos

A fim de se avaliar o desempenho dos modelos de regionalização hidrológica propostos por Liazi et al. (1988), IGAM (2012) e Wolff et al. (2014), foram comparadas as vazões de referência obtidas por intermédio de cada um destes modelos com as vazões calculadas mediante aos dados medidos nas estações fluviométricas pelo aplicativo SisCAH 1.0.

Moriasi et al. (2015) propôs diretrizes para a avaliação de modelos que calculam vazão em bacias hidrográficas. Para tanto, estes autores recomendaram o cálculo de cinco testes estatísticos quantitativos, são eles: índice de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), viés percentual (PBIAS), razão entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados (RSR) e o coeficiente de determinação (R^2).

Em um primeiro momento, com o objetivo de se avaliar o desvio da reta de regressão em relação a reta 1:1, foi calculado o índice d de Willmott (1981), ou índice de concordância (d) (Equação 34). Este assume o valor máximo de 1,0 quando a reta de regressão coincide com a reta 1:1. O índice de concordância pode detectar diferenças aditivas e proporcionais nos meios e variâncias observados e simulados. No entanto, d é excessivamente sensível a valores extremos devido às diferenças quadradas (LEGATES e MCCABE, 1999).

$$d = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - P| + |P_i - P|)^2} \right| \quad (34)$$

Em que:

E_i – Valor estimado;

P_i – Valor padrão observado; e

P – Média dos valores padrões observados.

O teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Equação 35) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variação de dados medidos (NASH e SUTCLIFFE, 1970). O NSE varia entre $-\infty$ e 1,0 (1 inclusive), sendo $NSE = 1$ o valor ótimo. Os valores entre 0,0 e 1,0 geralmente são vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto que valores $< 0,0$ indicam desempenho inaceitável.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - P|)^2} \right] \quad (35)$$

O viés percentual (PBIAS) (Equação 36) mede a tendência média dos dados estimados serem maiores ou menores do que as suas homólogas observadas (GUPTA et al., 1999). O valor ótimo do PBIAS é 0,0, com valores de baixa magnitude que indicam a simulação precisa do modelo. Os valores positivos indicam viés de subestimação do modelo, e os valores negativos indicam viés de superestimação do modelo (GUPTA et al., 1999). Segundo Moriasi et al. (2007), o PBIAS pode dar uma classificação enganosa do desempenho do modelo se este o superpredita tanto quanto subpredita, neste caso o PBIAS será próximo de zero mesmo que as simulações do modelo sejam ruins. Recomenda-se, portanto, que o PBIAS seja usado com outras estatísticas e gráficos para determinar o desempenho do modelo.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - E_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \cdot 100 \right] \quad (36)$$

O RSR (Equação 37) varia do valor ideal de 0, o que indica zero RMSE (raiz do erro médio quadrático) ou variação residual e, portanto, simulação de modelo perfeito. Quanto mais baixo o RSR, menor o RMSE, e melhor o desempenho da simulação do modelo (MORIASI et al., 2007). O RSR ainda não foi amplamente utilizado na literatura de modelagem hidrológica, uma vez que é uma medida de desempenho estatística relativamente nova.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - E_i)^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (|P_i - P|)^2} \right]} \quad (37)$$

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 38) descreve o grau de colinearidade entre os dados simulados e medidos. R^2 varia de 0 a 1, com valores mais altos indicando menos

variação de erro, e tipicamente valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis (SANTHI et al., 2001, VAN LIEW et al., 2003).

$$R^2 = \left[\frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - P)(E_i - E)]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (|P_i - P|)^2} \right] \sqrt{\sum_{i=1}^n (|E_i - P|)^2}} \right]^2 \quad (38)$$

Os critérios de avaliação de desempenho referem-se a classificações qualitativas de desempenho do modelo (por exemplo, muito bom, bom, satisfatório ou insatisfatório) com os limiares quantitativos correspondentes para cada índice estatístico. Na Tabela 3 são apresentados estes critérios de avaliação, os quais foram recomendados por Moriasi et al. (2015) resultado de uma combinação de estudos anteriores relatados na literatura (AL-QURASHI et al., 2008; MORIASI et al., 2007; DUDA et al., 2012; HERR e CHEN, 2012; MA et al., 2012; SKAGGS et al., 2012; WANG et al., 2012).

Tabela 3. Critérios de avaliação de desempenho para os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica (adaptado de MORIASI et al., 2015)

Índices	Performance			
	Muito bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
R²	> 0,85	0,75 < R ² ≤ 0,85	0,60 < R ² ≤ 0,75	≤ 0,60
NSE	> 0,80	0,70 < NSE ≤ 0,80	0,50 < NSE ≤ 0,70	≤ 0,50
PBIAS (%)	< ± 5	± 5 ≤ PBIAS ≤ ± 10	± 10 ≤ PBIAS ≤ ± 15	PBIAS ≥ ± 15
d	> 0,90	0,85 < d ≤ 0,90	0,75 < d < 0,85	d ≤ 0,75

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Delimitação das bacias de drenagem

Na Figura 7 são apresentadas as duas bacias de drenagem com suas segmentações e as 5 estações fluviométricas estudadas nesse trabalho. A maior área de bacia de drenagem foi a da estação 62590000, com aproximadamente 955 Km²; esta localiza-se no município de Extrema-MG e mede a vazão do rio Jaguari; em contrapartida, a menor foi a estação 62620000 com 102 Km², estabelecida no município de Monte Alegre do Sul-SP, e mede a vazão do rio Camanducaia.

Figura 7. Bacias de drenagem das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

5.2. Cálculo da precipitação anual média para as bacias de drenagem

Determinou-se a precipitação média anual para as bacias de drenagem a partir do cálculo da média ponderada da precipitação em relação a área de drenagem, interpolada entre duas isoietas consecutivas; o mapa de isoietas utilizado encontra-se na seção 4.1.4 desse trabalho. Utilizou-se a Equação 17 para o cálculo; os resultados da aplicação desse método estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Precipitação média anual referente às bacias hidrográficas das estações fluviométricas calculadas por intermédio da média ponderada entre isoietas consecutivas

Posto	Município	Estado	Rio	P (mm)
62625000	Amparo	São Paulo	Camanducaia	1554,23
62620000	Monte Alegre do Sul	São Paulo	Camanducaia	1600,00
62622000	Monte Alegre do Sul	São Paulo	Camanducaia	1596,13
62590000	Extrema	Minas Gerais	Jaguari	1733,37
3D-001	Jaguariúna	São Paulo	Camanducaia	1501,55

Tais resultados estão de acordo com a descrição pluviométrica apresentada pela Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE, 2011). Segundo esse relatório, os índices de precipitação pluviométrica, em média, variam entre 1200 e 1800 mm anuais nas bacias PCJ (Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá). Destaca-se que nos trechos das cabeceiras dos cursos formadores do rio Piracicaba, na região da Serra da Mantiqueira, a leste de Bragança Paulista, ocorrem as maiores precipitações pluviométricas, cujos índices superam os 2000 mm anuais.

Vale ressaltar que o Rio Piracicaba é formado a partir da confluência dos Rios Atibaia e Jaguari; o último possui suas nascentes no extremo sul de Minas Gerais, região que compreende a Serra da Mantiqueira, e possui como importante afluente o Rio Camanducaia mineiro.

Em relatório publicado pela IRRIGART (2007), efetuou-se uma interpolação dos valores encontrados nos postos pluviométricos das Bacias PCJ, e com base nos Polígonos de Thiessen determinou-se a precipitação média mensal para cada sub-bacia. Para a Sub-Bacia do Rio Camanducaia obteve-se uma média histórica anual de 1576 mm, ao mesmo tempo que a média aritmética simples entre para as precipitações anuais apresentadas na Tabela 4 desse trabalho para o Rio Camanducaia ficou em 1562 mm, apresentando, assim, coerência.

5.3. Resultados das vazões Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ calculadas por intermédio das séries históricas das estações fluviométricas

5.3.1. Vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{med}

As vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} exprimem, respectivamente, o valor de vazão em que 90% ou 95% dos dados diários de vazão da série são iguais ou superiores, ou seja, 10% ou 5% das vazões são inferiores a esses valores. A vazão média de longo período (Q_{med}) consistiu-

se no cálculo da média aritmética das vazões apresentadas em cada série histórica. Essa vazão retrata a disponibilidade hídrica máxima de uma bacia, uma vez que a mesma é a maior vazão que, teoricamente, pode ser regularizada, permitindo-se assim a avaliação dos limites superiores do uso da água de um manancial para diferentes fins.

Na tabela a seguir é apresentado o resultado dessas vazões calculadas por intermédio dos dados colhidos em cada posto fluviométrico.

Tabela 5. Dados das estações fluviométricas utilizadas para calcular Q_{95} , Q_{90} e Q_{med} , e seus respectivos valores estimados pelas séries históricas

Posto	Rio	Área (Km ²)	Lat (°)	Long (°)	Q_{95} (m ³ .s ⁻¹)	Q_{90} (m ³ .s ⁻¹)	Q_{med} (m ³ .s ⁻¹)
62620000	Camanducaia	102	-22,728	-46,438	0,585	0,712	2,224
62622000	Camanducaia	387	-22,687	-46,678	2,127	2,539	6,977
62625000	Camanducaia	663	-22,711	-46,780	3,870	4,569	11,414
3D-001	Camanducaia	928	-22,676	-46,967	3,881	4,674	13,949
62590000	Jaguari	955	-22,871	-46,361	8,184	9,191	21,354

Na Figura 8 é ilustrada a diferença entre as vazões de permanência obtidas a partir dos dados observados nos postos fluviométricos. As variações entre as áreas de drenagem das estações são diretamente proporcionais às vazões de permanência e as vazões médias de longo período apresentadas na Tabela 5.

Figura 8. Curvas de permanência calculadas a partir das séries das estações fluviométricas utilizadas nesse trabalho, onde o eixo das ordenadas representa as vazões em escala logarítmica e o eixo das abscissas demonstra a frequência de ocorrência dessas vazões.

Equanto a vazão média da estação 62620000 é de $2,224 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, a do posto 62590000 apresenta o valor de $21,354 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e 955 Km^2 de área de drenagem. Por outro lado, a estação 3D-001, a qual se assemelha no quesito área à estação 62590000, possui uma vazão média de $13,949 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, valor esse expressivamente menor do que o observado no posto semelhante. Tal diferença pode ser explicada pelo regime pluviométrico de cada um desses locais e também pela diferença altimétrica entre as duas regiões (Tabela 5 a 10).

5.3.2. Vazão de referência $Q_{7,10}$

A distribuição Logpearson 3 foi a utilizada para o ajuste dos dados, pois foi a que melhor se regulou às séries Q_7 para as cinco estações fluviométricas estudadas. Como realizado por Souza et al. (2011), o presente estudo testou outras quatro distribuições estatísticas, são elas: Weibull, Pearson 3, Lognormal 2 e Lognormal 3.

Tabela 6. Distribuições estatísticas usadas para calcular a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos, respectivos valores de $Q_{7,10}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), intervalos de confiança e amplitude do intervalo para a estação 62590000

Distribuição	$Q_{7,10}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Intervalo de confiança superior (95%)	Intervalo de confiança inferior (95%)	Amplitude do intervalo
Weibull	5,87	7,56	4,19	3,3693
Pearson 3	6,55	10,35	2,75	7,5975
Logpearson 3	5,61	6,50	4,72	1,7835
Lognormal 2	5,18	6,67	3,69	2,9801
Lognormal 3	5,51	7,67	3,34	4,3326

Tabela 7. Distribuições estatísticas usadas para calcular a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos, respectivos valores de $Q_{7,10}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), intervalos de confiança e amplitude do intervalo para a estação 62625000

Distribuição	$Q_{7,10}$ ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)	Intervalo de confiança superior (95%)	Intervalo de confiança inferior (95%)	Amplitude do intervalo
Weibull	2,43	2,74	2,12	0,6184
Pearson 3	2,47	2,80	2,14	0,6555
Logpearson 3	2,49	2,76	2,22	0,5440
Lognormal 2	2,50	2,88	2,13	0,7506
Lognormal 3	2,43	2,79	2,07	0,7219

Tabela 8. Distribuições estatísticas usadas para calcular a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos, respectivos valores de $Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$), intervalos de confiança e amplitude do intervalo para a estação 62622000

Distribuição	$Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$)	Intervalo de confiança superior (95%)	Intervalo de confiança inferior (95%)	Amplitude do intervalo
Weibull	1,45	1,77	1,14	0,6281
Pearson 3	1,73	2,46	0,99	1,4640
Logpearson 3	1,41	1,55	1,27	0,2737
Lognormal 2	1,24	1,52	0,95	0,5666
Lognormal 3	1,44	2,47	0,40	2,0703

Tabela 9. Distribuições estatísticas usadas para calcular a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos, respectivos valores de $Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$), intervalos de confiança e amplitude do intervalo para a estação 3D-001

Distribuição	$Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$)	Intervalo de confiança superior (95%)	Intervalo de confiança inferior (95%)	Amplitude do intervalo
Weibull	2,80	3,47	2,14	1,3235
Pearson 3	3,25	4,70	1,80	2,9094
Logpearson 3	2,68	2,95	2,40	0,5488
Lognormal 2	2,36	2,92	1,81	1,1165
Lognormal 3	2,72	4,54	0,89	3,6464

Tabela 10. Distribuições estatísticas usadas para calcular a vazão mínima com duração de sete dias e período de retorno de 10 anos, respectivos valores de $Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$), intervalos de confiança e amplitude do intervalo para a estação 62620000

Distribuição	$Q_{7,10}$ ($m^3.s^{-1}$)	Intervalo de confiança superior (95%)	Intervalo de confiança inferior (95%)	Amplitude do intervalo
Weibull	0,30	0,47	0,13	0,3373
Pearson 3	0,36	0,71	0,00	0,7090
Logpearson 3	0,28	0,36	0,20	0,1605
Lognormal 2	0,28	0,46	0,10	0,3549
Lognormal 3	0,26	0,47	0,05	0,4190

Finkler et al. (2015), comparando funções de distribuição para determinação de vazões mínimas na Bacia Hidrográfica do Arroio Belo, nordeste do Rio Grande do Sul, também apontaram a distribuição Logpearson 3 como a que demonstra maior precisão na representação deste tipo de dados.

Souza et al. (2011), caracterizando vazões mínimas em uma microbacia hidrográfica no Distrito Federal, também estabeleceram a distribuição Logpearson 3 como a mais indicada para a representação da vazão mínima Q_7 .

Ao analisar 1505 séries de vazões mínimas nos Estados Unidos, utilizando diversas funções de distribuição, Kroll et al. (2002) concluíram que as distribuições de Pearson tipo 3 e a Lognormal 3 foram as que melhores se ajustaram ao estudo.

Conforme publicado por Reilly e Kroll (2003) e Kroll et al. (2004), nos Estados Unidos, o USGS indica a utilização do parâmetro $Q_{7,10}$ calculado a partir da distribuição Logpearson 3 para se analisar as vazões mínimas. Muito embora, esses mesmos autores declarem que não existe um consenso quanto a melhor distribuição para a Q_7 nos Estados Unidos.

Leme e Chaudhry (2005) analisaram as distribuições de Gumbel e de Weibull na determinação da $Q_{7,10}$ no vale médio do rio Jaguari Mirim, Estado de São Paulo, e concluíram que o ajuste dado pela distribuição de Weibull foi melhor que aquele dado pela distribuição de Gumbel.

Wolff (2013) testou 24 distribuições de probabilidade, dentre elas todas as estudadas neste trabalho, para dados fluviométricos do Estado de São Paulo. As distribuições que mais se destacaram foram as de Burr, Jonson SB, Cauchy e Dagum.

Também diferindo do resultado deste trabalho, Silva et al. (2006) demonstram que a distribuição Lognormal 3 obteve o melhor ajuste na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, Estado de Minas Gerais, para as vazões mínimas. No trabalho desses autores foram também testadas as distribuições de Gumbel e Weibull.

Sendo assim, entende-se que não existe uma distribuição de probabilidade superior a outra para todos os casos e que a generalização de uma regra pode acarretar no aumento dos erros para o cálculo de vazões mínimas de referência, fato que endossa a importância desta análise.

5.4. Avaliação dos modelos de regionalização hidrológica trabalhados

As avaliações dos três modelos foram realizadas comparando-se com os resultados obtidos pela análise das séries históricas descritas nos itens anteriores. Os critérios de avaliação de desempenho referem-se a classificações qualitativas de desempenho do modelo (por exemplo, muito bom, bom, satisfatório ou insatisfatório) com os limiares quantitativos correspondentes para cada índice estatístico. Na Tabela 3, presente no item 4.4., são apresentados esses critérios de avaliação, os quais foram recomendados por Moriasi et al. (2015).

5.4.1. Avaliação do modelo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988)

Sobre o ajuste dos dados estimados pelo modelo de Liazi et al. (1988) e os observados pelo método padrão, ou seja calculados pelas séries históricas das estações fluviométricas, e averiguando-se os indicadores estatísticos testados, verifica-se, pelas Tabelas 11 e 12, que, para a Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ o modelo apresentou ajuste, classificado pelo índice de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), vies percentual (PBIAS) e coeficiente de determinação (R^2), como, no geral, muito bom.

Tabela 11. Resultados dos critérios de avaliação de desempenho segundo os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica por Moriasi et al. (2015) para o modelo de Liazi et al. (1988)

	NSE	Pbias (%)	RSR	d	R^2
Q_{90}	0,944426	7,5	0,210853	0,985455	0,978728
Q_{95}	0,926225	8,1	0,242941	0,979897	0,970747
Q_{med}	0,99758	-0,7	0,043998	0,999396	0,99888
$Q_{7,10}$	0,927833	9,0	0,240278	0,979698	0,975022

Tabela 12. Classificação dos critérios de avaliação de desempenho para os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica por Moriasi et al. (2015) aplicadas ao modelo de Liazi et al. (1988)

	NSE	Pbias (%)	d	R^2
Q_{90}	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Q_{95}	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Q_{med}	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
$Q_{7,10}$	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom

Wolff et al. (2012), avaliando o modelo de Liazi et al. (1988) por intermédio de 177 estações fluviométricas do Estado de São Paulo, apresentou valores semelhantes ao calcular o índice de concordância d . Para todos os parâmetros avaliados (Q_{med} , Q_{90} , Q_{95} , $Q_{7,10}$) o valor do índice d foi superior a 0,9. Já os valores obtidos pelos mesmos autores ao calcular o coeficiente de determinação R^2 foram considerados ‘bons’ para os parâmetros Q_{90} e Q_{95} e ‘muito bons’ nos parâmetros Q_{med} e $Q_{7,10}$.

A constatação anterior é importante, uma vez que a $Q_{7,10}$ é utilizada como vazão de referência para a concessão de uso de recursos hídricos no Estado de São Paulo, sendo permitida a captação, a fio d’água, de até 50% da mesma, deixando a jusante o restante. Em rios federais, a Q_{95} é o parâmetro empregado, permitindo-se a captação, a fio d’água de 70% desta; portanto,

o modelo proposto por Liazi et al. (1988) adequa-se satisfatoriamente a diferentes critérios de outorga.

Na Figura 9 são apresentados quatro gráficos de dispersão, tendo em vista a proximidade dos pontos à reta 1:1 os mesmos confirmam os resultados dos índices analisados e demonstram que os valores obtidos pelos modelos se aproximam àqueles obtidos a partir dos cálculos com as séries históricas.

Figura 9. Gráficos de dispersão entre vazões estimadas pelo modelo de regionalização de Liazi et al. (1988) (ordenadas) e calculados pelas das estações fluviométricas (abscissas). Em que A = Q_{med} , B = Q_{90} , C = Q_{95} , D = $Q_{7,10}$ e 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.

O modelo de regionalização hidrológica de Liazi et al. (1988) superou as expectativas do presente estudo, pois era incerto o comportamento desta metodologia diante da atualização dos dados fluviométricos; contudo, segundo os índices estatísticos vistos acima, o modelo mostrou-se eficaz na estimativa das vazões de referência analisadas neste trabalho. Isto confirma a hipótese de estacionariedade das séries fluviométricas. Assim, o modelo pode ser aproveitado como instrumento importante no auxílio a projetos de outorga e na gestão da Política Estadual de Recursos Hídricos.

5.4.2. Avaliação do modelo de regionalização hidrológica de Minas Gerais (IGAM, 2012)

No que tange ao ajuste dos dados estimados pelo modelo do IGAM (2012) em relação aos observados pelo método padrão, ou seja calculado pelas séries históricas das estações fluviométricas, e averiguando-se os indicadores estatísticos testados, verifica-se, pelas Tabelas 13 e 14, que, para a Q_{90} , Q_{95} , Q_{med} e $Q_{7,10}$ o modelo apresentou ajuste, classificado pelos índices de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e viés percentual (PBIAS), como, no geral, insatisfatório. Por outro lado, analisando-se o coeficiente de determinação (R^2), o modelo apresentou desempenho muito bom para todos os parâmetros.

Tabela 13. Resultados quantitativos dos critérios de avaliação de desempenho segundo os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica por Moriasi et al. (2015) para o modelo do IGAM (2012)

	NSE	Pbias (%)	RSR	d	R^2
Q_{90}	-0,0277606	-49,7	0,9067571	0,6561005	0,87483
Q_{95}	-0,1267349	-53,7	0,9494145	0,6235996	0,85676
Q_{med}	0,38981583	-35,3	0,6986754	0,7867031	0,93838
$Q_{7,10}$	-0,1727795	-57,3	0,9686194	0,608557	0,8652

Tabela 14. Classificação qualitativa dos índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica segundo Moriasi et al. (2015), para o modelo do IGAM (2012)

	NSE	Pbias (%)	d	R^2
Q_{90}	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito bom
Q_{95}	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito bom
Q_{med}	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório	Muito bom
$Q_{7,10}$	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito bom

Na Tabela 15 são apresentados os coeficientes de determinação (R^2) para o Estudo de Regionalização de Vazões do Estado de Minas Gerais referente ao modelo proposto aplicado à Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba-Jaguari. Nota-se que há uma concordância entre os resultados obtidos pelo presente trabalho e aqueles adaptados da publicação do IGAM (2012).

Tabela 15. R^2 para o modelo de Regionalização Hidrológica de IGAM (2012)

	Q_{90}	Q_{95}	Q_{med}	$Q_{7,10}$
R^2	0,87327	0,89912	0,96491	0,82139

Fonte: Adaptado de IGAM (2012)

Em contrapartida, na Figura 10 são apresentados quatro gráficos de dispersão em que o desempenho do modelo mineiro demonstrou menor exatidão quando comparado à estimativa do modelo paulista neste tipo de análise. A estação 62590000, por exemplo, teve um erro relativo percentual que variou de 47% a 69%.

Figura 10. Gráficos de dispersão entre vazões estimadas pelo modelo de regionalização do IGAM (2012) (ordenadas) e calculados por meio das estações fluviométricas (abscissas). Em que A = Q_{med} , B = Q_{90} , C = Q_{95} , D = $Q_{7,10}$ e 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.

Verifica-se que todos os pontos analisados se encontram na parte inferior da reta 1:1; tal fato resulta de uma subestimativa dos valores calculados pelo modelo; assim, pode-se dizer que a regionalização hidrológica mineira proposta, quando aplicada à Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba-Jaguari, trabalha a favor da conservação dos recursos hídricos. Além disso, em alguns pontos a subestimativa observada é mais acentuada, o que pode levar os usuários a conflitos com a agência gestora de recursos hídricos. Neste sentido, ao adotar esse modelo é admissível que se estabeleçam critérios de outorga menos conservadores, bem como a adoção de vazões de referência sazonais, que correspondam às condições trimestrais de seca, sendo que nos períodos chuvosos uma maior quantidade do recurso estaria passível de ser outorgada.

5.4.3. Avaliação da Nova Proposta de Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo (WOLFF et al., 2014)

Em relação ao ajuste dos dados estimados pelo modelo de Wolff et al. (2014) e em relação aos observados pelo método padrão, ou seja calculado pelas séries históricas das estações fluviométricas, e averiguando-se os indicadores estatísticos testados, verifica-se, pelas Tabelas 15 e 16, que, para a Q_{90} , Q_{95} , $Q_{7,10}$ o modelo apresentou ajuste, classificado pelos índices de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), vies percentual (PBIAS) e coeficiente de determinação (R^2), como, no geral, insatisfatório. Por outro lado, analisando-se o parâmetro Q_{med} o modelo apresentou desempenho de satisfatório a muito bom.

Tabela 16. Resultados qualitativos dos critérios de avaliação de desempenho segundo os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica por Moriasi et al. (2015) para o modelo de Wolff et al. (2012)

	NSE	Pbias (%)	RSR	d	R^2
Q_{90}	0,280929	-21,9	0,758457	0,703207	0,628337
Q_{95}	0,149537	-24,8	0,824846	0,651761	0,532519
Q_{med}	0,763973	-14,0	0,434536	0,920958	0,925141
$Q_{7,10}$	0,106639	-23,0	0,845393	0,632184	0,471433

Tabela 17. Classificação qualitativa dos critérios de avaliação de desempenho segundo os índices estatísticos recomendados para modelos de regionalização hidrológica por Moriasi et al. (2015), aplicado a Wolff et al. (2014)

	NSE	Pbias (%)	d	R^2
Q_{90}	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Satisfatório
Q_{95}	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
Q_{med}	Bom	Satisfatório	Muito bom	Muito bom
$Q_{7,10}$	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

Na Tabela 18 está indicado o coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância (d) apresentados na nova Dissertação proposta de Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo. Nota-se que há uma discordância entre os resultados obtidos pelo presente trabalho e aqueles atingidos por Wolff et al. (2014). Uma vez que para todos os parâmetros os autores citados classificaram sua estimativa como ótima.

Tabela 18. R^2 e d para o modelo de Regionalização Hidrológica de Wolff et al. (2014), aplicado à bacia do presente estudo

	Q_{90}	Q_{95}	Q_{med}	$Q_{7,10}$
R^2	0,94	0,92	0,97	0,92
d	0,99	0,98	0,98	0,98

Fonte: Adaptado de Wolff et al. (2014).

Por outro lado, analisando-se graficamente os resultados do modelo de Wolff et al. (2014), percebe-se que o desempenho da estimativa para as estações 62620000, 62622000, 62625000 e 3D-001 demonstrou baixa variação em relação a reta 1:1, menor do que aquela observada no modelo proposto por Liazi et. al. (1988) neste tipo de análise (Figura 9). Desta forma, a Nova Proposta de Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo apresentou melhor desempenho do que a atual metodologia de regionalização hidrológica utilizada no mesmo Estado para os pontos 1, 2, 3 e 4 (Figura 11).

Já a estação 62590000 é a maior em área de drenagem e apresentou um erro relativo percentual que variou de 32% a 65%. A estação em questão é a única do estudo que se localiza em território mineiro e também apresentou erro relativo semelhante quando a mesma análise foi realizada para o modelo proposto por IGAM (2012). O desempenho insatisfatório do modelo de Wolff et al. (2014) apresentado na Tabela 17, pode ter sido afetado pela má performance na previsão desta estação, uma vez que graficamente as demais demonstraram boa exatidão quando comparadas aos resultados obtidos a partir das séries históricas.

Figura 11. Gráficos de dispersão entre vazões estimadas pelo modelo de regionalização de Wolff et al. (2014) (ordenadas) e as calculadas por intermédio das estações fluviométricas (abscissas). Em que A = Q_{med} , B = Q_{90} , C = Q_{95} , D = $Q_{7,10}$ e 1 = 62620000, 2 = 62622000, 3 = 62625000, 4 = 3D-001, 5 = 62590000.

5.5. Comparação entre os modelos de regionalização hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari

As Figuras 12, 13 e 14 possuem o objetivo de avaliar graficamente o desempenho dos modelos de regionalização hidrológica propostos por Liazi et al. (1988), IGAM (2012) e Wolff et al. (2014), por intermédio da análise de índices estatísticos atingidos por cada metodologia em cada parâmetro.

Figura 12. Desempenho dos modelos de regionalização estudados no que diz respeito ao Índice de Concordância (d) para cada parâmetro avaliado.

Analisando-se o Índice de Concordância (d), é possível notar a superioridade das estimativas da atual metodologia de regionalização utilizada no Estado de São Paulo sobre as demais em estudo (LIAZI et al., 1988). Nessa verificação o modelo menos exato foi o proposto por IGAM (2012).

Figura 13. Desempenho dos modelos de regionalização estudados no que diz respeito ao Coeficiente de Determinação (R^2) para cada parâmetro avaliado.

Analisando-se o coeficiente de determinação (R^2) observa-se novamente a superioridade das estimativas da metodologia de Liazi et al. (1988) sobre as demais em estudo. Nesta verificação o modelo menos exato foi o proposto por Wolff (2014).

Na Figura 14 é apresentado o Erro Relativo Percentual para os modelos avaliados neste trabalho. Observa-se que todas as metodologias trabalham a favor da conservação dos recursos hídricos na região avaliada, ou seja, em geral tendem a subestimar as vazões de referência.

Figura 14. Desempenho dos modelos hidrológicos estudados no que diz respeito ao Erro Relativo Percentual para cada parâmetro avaliado.

No que diz respeito ao parâmetro $Q_{7,10}$, o qual é a vazão de referência mínima utilizada nos Estados de Minas Gerais e São Paulo, nota-se que o menor erro relativo ocorreu para o modelo de Wolff et al. (2014) e, mais uma vez, o modelo que se mostrou menos exato foi o proposto por IGAM (2012).

Evidencia-se, a partir das análises realizadas neste trabalho, que a melhor metodologia de regionalização hidrológica para a Região do Alto Rio Jaguari é a de Liazi et al. (1988); a mesma se mostrou superior aos demais métodos, inclusive para a estação 62590000 localizada no município de Extrema-MG.

Vale ressaltar que o aplicativo desenvolvido pelo DAEE, o qual utiliza a metodologia de Regionalização Hidrológica proposta por Liazi et al. (1988), apresenta uma falha na inserção da variável precipitação média anual e por isso, nesse trabalho, optou-se pela utilização de planilhas eletrônicas para o cálculo do referido método.

A Nova Proposta de Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo apresentou resultados bons no que tange a avaliação do Erro Relativo Percentual para quase todas as estações, exceto para a estação 62590000. Acredita-se que existe um grande potencial na utilização deste método; por se tratar de um trabalho recente o mesmo pode evoluir e trazer estimativas mais coerentes para todas as Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo.

O modelo do IGAM (2012), para a Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba-Jaguari, teve desempenho insatisfatório, excluindo-se a avaliação do Coeficiente de determinação (R^2). O modelo proposto para essa região do Estado de Minas Gerais considera apenas a área de drenagem como variável explicativa para as vazões de referência; tal fato, sabendo-se da complexidade da dinâmica solo – água – planta, pode corroborar para o mau desempenho dessa metodologia na área em estudo.

5.6. Considerações finais

O modelo de Liazzi et al. (1988) apresentou ajuste, classificado pelo índice de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação (R^2), como muito bom. A metodologia em questão superou as expectativas do presente estudo, pois era incerto o comportamento desta metodologia diante da atualização dos dados fluvimétricos; contudo, segundo os índices estatísticos indicados acima, o modelo mostrou-se eficaz na estimativa das vazões de referência analisadas neste trabalho. Pode, desta forma, ser aproveitado como instrumento importante no auxílio a projetos de outorga e na gestão da política estadual de recursos hídricos.

A metodologia do IGAM (2012) demonstrou ajuste insatisfatório para os indicadores estatísticos NSE, PBIAS e índice d e muito bom para o coeficiente de determinação (R^2). Também se verificou uma subestimativa nos valores estimados pelo modelo; assim, pode-se dizer que a regionalização hidrológica mineira, proposta para a Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba-Jaguari, trabalha a favor da conservação dos recursos hídricos; além disso, em alguns pontos a subestimativa observada é acentuada, o que pode levar os usuários a conflitos com a agência gestora de recursos hídricos. Recomenda-se, portanto, critérios de outorga menos conservadores, bem como a adoção de vazões de referência sazonais, que correspondam às condições trimestrais de seca, sendo que nos períodos chuvosos uma maior quantidade do recurso estaria passível de ser outorgada.

A Nova Proposta de Regionalização Hidrológica para o Estado de São Paulo de Wolff et al. (2014) apresentou ajuste, classificado pelos índices de concordância (d), teste de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), viés percentual (PBIAS) e coeficiente de determinação (R^2), como, no geral, insatisfatório. Analisando-se especificamente o parâmetro Q_{med} , o modelo apresentou desempenho de satisfatório a muito bom. Em contrapartida, analisando-se graficamente os resultados do modelo, percebe-se que o desempenho da estimativa para as estações 62620000, 62622000, 62625000 e 3D-001 demonstraram baixa variação em relação a reta 1:1, menor do que aquela observada no modelo proposto por Liazi et. al. (1988) nesse tipo de análise.

No trabalho dessa Dissertação, a metodologia de Liazi et al. (1988) se mostrou superior aos demais métodos. Por outro lado, o aplicativo desenvolvido pelo DAEE com o objetivo de calcular vazões de referência por esse método, apresentou uma inconsistência metodológica entre as datas de agosto de 2017 e dezembro de 2018 na inserção da variável precipitação média anual, o que gera uma estimativa equivocada para os corpos d'água do Estado de São Paulo. O modelo de Wolff et al. (2014) demonstrou potencial na utilização do método. A grande vantagem dele é a ausência de necessidade da inserção da precipitação anual média, que é uma variável difícil de ser determinada por um *software*. A metodologia do IGAM (2012) para a Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba-Jaguari teve desempenho insatisfatório, excluindo-se a avaliação do R^2 . A simplicidade do modelo, o qual possui uma única variável independente, pode ter cooperado para o seu mau desempenho.

Os resultados desse trabalho foram frutos da análise das estações fluviométricas pertencentes ao Alto da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, a montantes dos reservatórios do Sistema Cantareira; sendo assim, recomenda-se a aplicação de estudos comparativos semelhantes em outras Sub-Bacias localizadas entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, para corroborar ou não com as conclusões obtidas.

6. CONCLUSÕES

Com base na análise de dados e de acordo com o objetivo geral traçado por este trabalho, concluiu-se:

- a) Dos três modelos avaliados, aquele que teve o melhor desempenho para a Bacia do Alto do Rio Jaguari foi o de Liazi et al. (1988);
- b) Em segundo lugar cita-se o de Wolff et al. (2014), que não estimou bem os dados do posto de maior área de drenagem; e
- c) O modelo que menos se adequou ao alto da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, considerando-se sua performance, foi o do IGAM (2012), que subestimou todas as vazões medidas.

REFERÊNCIAS

- ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. *ASTER Users handbook*. Pasadena: JPL, 1999. 93p
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no país - Diretrizes e prioridades. Caderno de Recursos Hídricos. Volume 4. Brasília: ANA, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (Brasil). Outorga de direito de uso de recursos hídricos. *Caderno de Recursos Hídricos*. Volume 6. Brasília: ANA, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (Brasil). Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- AL-QURASHI, A.; MCINTYRE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH, C. Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *J. Hydrol.*, 355(1), 91-105, 2008.
- ANDRADE, E. M.; HAWKINS, R. H. Aplicação da função de Andrews na avaliação da regionalização de bacias em regiões áridas e semi-áridas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 4, p. 17-24, 2000.
- AZEVEDO, A. A. *Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paraná*. 2004. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2004.
- 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.

- BOBÉE, B.; RASMUSSEN, P. F. Recent advances in flood frequency analysis. *Reviews of Geophysics*, v.33 (S2), p. 1111-1116, 1995.
- BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L.; PALOS, J. C. F. *Balanço Hídrico do Estado de São Paulo*. Montevideo: UNESCO, 1991. 87p.
- BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. I da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, 9 jan. 1997.
- CÂMARA, A. C. F. C. *Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB)*. 2003. 219p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS. Porto Alegre, 2003.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARDOSO DA SILVA, L. M.; MONTEIRO, R. A. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens. *Gestão de Águas Doces*/Carlos José Saldanha Machado (Organizador). Capítulo V, p. 135-178. Rio de Janeiro: Interciência. 2004.
- 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 geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n. 3, p. 43-51, 2002.
- CHIANG, S. L.; JOHNSON, F. W. Low flow criteria for diversions and impoundments. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, 102: 227-238, 1976.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

- CLAPS, P.; FIORENTINO, M. Probabilistic flow duration curves for use in environmental planning and management. In: HARMANCIOGLU et al. (eds.). *Integrated Approach to Environmental Data Management Systems*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, NATO-ASI, series 2 (31), p. 255-266, 1997.
- COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. *Plano das bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá 2010 a 2020: relatório final*. São Paulo: Cobrape, 2011.
- CPRM. *Regionalização de vazões médias da bacia costeira do Nordeste*. CPRM/ANEEL. 2001.
- CRUZ, J. C. *Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação dos aspectos técnicos e conceituais*. 2001. 199p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 1, p. 111–124, 2008.
- DAWDY, D. R.; GRIFFIS, V. W.; GUPTA, K. V. Regional flood frequency analysis: How we got here and where we are going. *Journal of Hydrologic Engineering*, doi: 10.1061(ASCE)HE.1943-5584.0000584, 2012.
- DUDA, P. B.; HUMMEL JR., P. R.; DONIGIAN JR., A. S.; IMHOFF, J. C. BASINS/HSPF: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1523-1547, 2012.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro, v. 1, 1985.
- EUCLYDES, H.P.; SOUZA, E.F.; FERREIRA, P.A. *RH 3.0 – Regionalização hidrológica; manual do programa* - Viçosa: UFV, DEA; Brasília: DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS, 149p., 1999.

- EXTREMA (Cidade). Departamento de meio ambiente. *Projeto água é vida: diagnóstico sócio ambiental em sub bacias hidrográficas no município de Extrema*. Extrema, 2005.
- FINKLER, N. R.; MENDES, L. A.; SCHNEIDER, E. H. M.; BORTOLIN, T. A.; SCHNEIDER, V. E. Comparação de funções de distribuição de probabilidades na determinação de vazão mínima anual e sazonal. *Scientia Cum Industria (Sci. Cum Ind.)*, V. 3, n. 2, 42 — 49, 2015
- FLYNN, R. H. A Stream-gaging network analysis for the 7-Day, 10-year annual low flow in New Hampshire Streams. *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report* 03-4023, 2003.
- FRANCHINI, M.; SUPPO, M. Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. *Water Resource Management*, Dordrecht, Netherlands, v.10, p.199- 218, 1996.
- GAN, K. C.; MCMAHON, T. A.; O'NEILL, I. C. Errors in estimated streamflow parameters and storage for ungauged catchments. *Water Resources Bulletin*, 26 (3), 443–450. 1990.
- GARRIDO, R. J. S. Subprojeto 4.2B – Avaliação dos mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável da bacia do rio São Francisco. In: __. *Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco*. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003. 335p.
- GUIMARÃES, R. F. *Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis à escorregamentos rasos com controle topográfico: Adequação e calibração em duas bacias de drenagem*. 156 f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2000.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143, 1999.
- GUSTARD, A.; BULLOCK, A.; DIXON, J. M. Low flow estimation in the United Kingdom. *Institute of Hydrology Report*. n. 108, 1992.

- HARRIS, N. M.; GURNELL, A. M.; HANNAH, D. M.; PETTS, G. E. Classification of river regimes: a context for hidroecology. *Hydrological Processes*, Hardcover, v. 14, p. 2831-2848, 2000.
- HERR, J. W.; CHEN, C. W. WARMF: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1385-1394, 2012.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Regional frequency analysis: An approach based on L-moments. *Cambridge University Press*, UK, 1997.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais / Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV*. Belo Horizonte, 2012.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2010.
- IRRIGART – Eng. & Cons. Rec. Hid. e M. Ambiente Ltda. *Relatório de situação dos recursos hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí*. Piracicaba – 2002 a 2003. Piracicaba, 2005.
- IRRIGART – Eng. & Cons. Rec. Hid. e M. Ambiente Ltda. *Relatório síntese das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí : situação dos recursos hídricos 2004/2006*. Piracicaba, FEHIDRO/PCJ/CBJ-PCJ, 2007.
- KANG, H. The prevention and handling of the missing data. *Korean Journal of Anesthesiology*. 2013.
- KITE, G. W. *Frequency and risk analyses in hydrology*. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications. 1988. 257p.

- KROLL, C.; LUZ, J.; ALLEN, B.; VOGEL, R. M. Developing a watershed characteristics database to improve low streamflow prediction. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.9, p.116- 125, 2004.
- KROLL, C. N.; VOGEL, R. M. Probability distribution of low streamflow series in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.7, p.137-146, 2002.
- LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241, 1999.
- LEME, E. J. A.; CHAUDHRY, F. H. Vazão mínima do vale médio do rio Jaguari Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.10, p.127-136, 2005.
- LIAZI, A.; CONEJO, J. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo. São Paulo: *Revista Águas e Energia Elétrica – DAEE*, ano 5, n.14. p.4-10. 1988.
- LUIZ, T. *Regionalização hidrológica de vazões mínimas por meio do Método dos Mínimos Quadrados Generalizados aplicada à bacia do Alto São Francisco*. 2013. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- MA, L.; AHUJA, L.; NOLAN, B.; MALONE, R.; TROUT, T.; QI, Z. Root Zone Water Quality Model (RZWQM 2): Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1425-1446, 2012.
- MELATI, M. D. Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. *Ciencia e Natura*, v. 38, p. 722–739, 2016.
- MENDES, L. A. *Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência*. 2007. 187 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. da. Análise de métodos para estimativa das vazões da Bacia do Rio Paraopeba. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 313–324, 2014.
- MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans. ASABE*, 58(6), 1763-1785, 2015.
- MORIASI, D.; ARNOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3), 885-900, 2007.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*. 1.ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007.552p.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290, 1970.
- NERC. National Environmental Research Council. *Flood Studies Report*, Vol. 1. London: National Environmental Research Council, 1975.
- NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Secretaria de Planejamento da Presidência da República, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2ed. 1989.
- OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas/Rio de Janeiro: Instituto Agrônomo/Embrapa, 1999.
- ONO, S. *Análise dos critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos considerando a disponibilidade de água superficial*. 2006. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- 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.
- PESSOA, F. C. L. *Desenvolvimento de metodologia para regionalização de curvas de permanência de vazões na Amazônia legal*. 2015. 236p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- PINTO, J. A. O. *Avaliação de métodos para a regionalização de curvas de permanência de vazões para a bacia do rio das Velhas*. 2006. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- PLANO DE BACIAS PCJ (2010-2020). *Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá para o período de 2010 a 2020, com propostas de atualização de enquadramento dos corpos d'água e de Programa para Efetivação do Enquadramento dos corpos d'água até o ano de 2035*. COBRAPE. CBH-PCJ, 2010.
- 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*, v.476, p. 52-71, 2013.
- PRUSKI, F. F. et al. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 34, n. 3, p. 496-509, 2014.
- PYRCE, R., Hydrological low flow indices and their use. Peterborough, ON: *Watershed Science Centre*, Report No. 04-2004. 2004.
- RAMECH, I. M. B.; FREITAS, V. A. L.; CIRILO, J. A. *Importância da escolha das variáveis explicativas na regionalização de vazões em áreas com escassez de dados*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba. Anais...Curitiba: ABRH, 2003. CDROM.

- RAO, A. R.; SRINIVAS, W. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology*, v.381, n.1, p.37-56, 2006.
- REILLY, C. F.; KROLL, C. N. Estimation of 7-day, 10-year lowstreamflow statistics using baseflow correlation. *Water Resources Research*, v.39, p.1236-1245, 2003.
- RIBEIRO, M. M. R. *Alternativas para outorga e a cobrança pelo uso da água: Simulação de um caso*. 2000. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- RIGGS, H. C. Estimating flow characteristics at ungauged sites. In: Regionalisation in Hydrology, Proceedings of the Ljubljana Symposium, April 1990, *IAHS*, n. 191.
- SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. 2016. *Cantareira volta a abastecer mais 1 milhão de pessoas em abril de 2016*. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaoId=65&id=6943>>. Acesso: 27 de dezembro de 2017.
- SADRI, S.; BURN, D. H. A fuzzy C-means approach for regionalization using a bivariate homogeneity. *Journal of Hydrology*, v. 401, n.3, p.231-239. Elsevier, 2011.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188, 2001.
- SÃO PAULO. Lei nº9034, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH, a ser implantado no período de 1994 e 1995, em conformidade com a Lei n. 7663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. *Diário Oficial do Estado de São Paulo*, São Paulo, 1994.
- SILVA, J. T. N.; NOVO, V. L. T. Contribuição para o conhecimento das vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Capivari. In: Congresso Nacional de irrigação e drenagem, 8, Florianópolis, 1988. *Anais...* s.l. ABID. p. 1069-1084, 1988.

- SILVA JR., O. B. da; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.8 n.1, p.21–37, 2003.
- SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.374-380, 2006.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S. de; OLIVEIRA, R. B. de. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. *Idesia, Africa*, v. 26, n. 2, p. 75 - 81, 2008.
- SILVEIRA, G. L. da; ROBAINA, A. D.; GIOTTO, E.; DEWES, R. Outorga para uso dos recursos hídricos: aspectos práticos e conceituais para o estabelecimento de um sistema informatizado. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, p. 5–16, 1998.
- SINGB, K.P.; RAMAMURTHY, G.S.; SEO, I.W. 7-Day 10-year low flows of streams in the Rock, Spoon, La Moine, and Kaskaskia regions. *Illinois State Water Survey Contract. Report 440*, 1988.
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHIM, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E.M.; CONNELL, O.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrology Sciences Journal*. 48 (6), 857– 880, 2003.
- SKAGGS, R.; YOUSSEF, M.; CHESCHEIR, G. DRAINMOD: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1509-1522, 2012.
- SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. v.240, 147-186. 2001.

- SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R.C. *SISCAH Sistema Computacional para Análises Hidrológicas*. 1 ed. Brasília, DF; Viçosa, MG: UFV, 2009.
- SOUZA, F. A. O. de; SILVA, C. L. da; MAGGIOTO, S. R.; OLIVEIRA JR., M. P. Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.16, n.1, p.10 –17, 2012.
- STURGES, H. The choice of a class-interval. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 21, 65–66. 1926.
- TASKER, G. D.; STEDINGER, J. R. An operational GLS model for hydrologic regression. *Journal of Hydrology*, 111, 361-375. 1989.
- THOMAS, D. M.; BENSON, M. A. Generalization or streamflow characteristics, from drainage-basin characteristics. *Geological Survey Water-Supply Paper*. 1975, 55p., 1970.
- TNC, THE NATURE CONSERVANCY. *ICMS Ecológico*. Disponível em: <<http://icmsecológico.org.br/site/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- 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.; GENZ, F. *Caracterização hidrológica da bacia do Alto Paraguai (BAP)*. In: IPH-UFRGS, Hidrossedimentologia do Alto Paraguai. 1997.
- TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade/UFRGS: ABRH, Porto Alegre, 2000. 943 p.
- TUCCI, C.E.M. *Regionalização de vazões*. Porto Alegre, Ed. ABRH/ UFRGS, 2002. 256 p.
- VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551, 2003.

- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow-duration curves II. A Review of applications in water resources planning. *Water Resour Bull*, 31 (6): 1029-1039, 1995.
- VORST, P. C.; BELL, F. C. Geomorphic parameters of representative basins and their hydrologic significance. *Australian Water Resources Council Technical Paper*. 58:1-131, 1981.
- WANG, X.; WILLIAMS, J.; GASSMAN, P.; BAFFAUT, C.; IZAURRALDE, R.; JEONG, J.; KINIRY, J. EPIC and APEX: Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1447-1462, 2012.
- WHATELY, M., CUNHA, P. *Cantareira 2006: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo*. Instituto Socioambiental. São Paulo, 2007.
- WILKEN, P.S. *Engenharia de drenagem superficial*. 1978. São Paulo, CETESB. 477 p.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography* 2: 184-194, 1981.
- WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R.; LIMA, C. J. G. S.; SILVA, E. M. da. Avaliação do modelo de Regionalização Hidrológica do estado de São Paulo para o cálculo da Q7,10, Q90, Q95, Qm.. In: X Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola e XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2012, Londrina-PR. A Engenharia Agrícola na Evolução dos Sistemas de Produção. Jaboticabal-SP: SBEA, 2012. v. 1.
- WOLFF, W. *Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo*. 2013. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 19, n.4, p. 21-33, 2014.
- WRIGHT, L. S.; ENSMINGER, P. A. Regionalized regression equations for estimating lowflow characteristics for selected Louisiana streams. *Water Resources Technical Report*. No. 75, 2004.