

NÍVIA CARLA RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVATÓRIOS DE
REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES UTILIZANDO SÉRIES SINTÉTICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R696d
2017
Rodrigues, Nívia Carla, 1986-
Dimensionamento da capacidade de reservatórios de
regularização de vazões utilizando séries sintéticas / Nívia Carla
Rodrigues. – Viçosa, MG, 2017.
xiv, 73f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.60-71.

1. Recursos hídricos. 2. Reservatórios. 3. Medidores de
fluxo. 4. Água - Uso. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 333.91

NÍVIA CARLA RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVATÓRIOS DE
REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES UTILIZANDO SÉRIES SINTÉTICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de março de 2017.



Fernando França da Cunha



Antônio Calazans Reis Miranda



Roberto Avelino Cecílio



Sidney Sara Zanetti



Fernando Falco Pruski
(Orientador)

À minha mãe, que sabe interpretar meu olhar e me presenteia com orações, e ao Evandro, que sabe interpretar minha voz e me presenteia com companheirismo, dedico.

Fazei tudo por amor. Assim não há coisas pequenas: tudo é grande. A perseverança nas pequenas coisas, por amor, é heroísmo.

(Caminho, n. 813).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus porque esta tese é mais uma oportunidade dada por Ele de crescer e me tornar uma pessoa melhor. Agradeço também à Maria Santíssima, pelas vezes em que a ansiedade bateu no peito e seu amor me acalmou.

Agradeço aos meus pais Lourival e Maria, que mesmo sem entender o meu trabalho, me diziam que estavam rezando por mim e que tudo daria certo. Ouvir isso é um presente! Agradeço também aos meus irmãos, Fernanda e Diego, por estarem comigo em mais essa etapa.

Agradeço ao Evandro, que sempre me ajudou e se fez presente. Esse companheirismo só fez aumentar o amor que já sinto por ele.

Ao Professor Pruski, eu agradeço por cada um dos mil exemplos que me deu para explicar alguma coisa da tese. Eram exemplos de dietas, de jogo de futebol, sempre antecedidos pelo “imaginas que tu”. Eu sei que era a sua maneira de tornar a compreensão das coisas mais fáceis. Aprendi muita coisa. Obrigada.

Agradeço aos professores Roberto Cecílio e Sidney Zanetti, da Universidade Federal do Espírito Santo, por se deslocarem de longe para participar da minha defesa; ao Antônio Miranda, do Ministério do Meio Ambiente e ao Professor Fernando Cunha, da UFV, que aceitaram com tão boa vontade fazer parte da banca.

Agradecimento especial ao doutorando José Rui, que desenvolveu um programa computacional para dinamizar o meu trabalho. Sua ajuda foi primordial!

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, essencial para dedicação à pesquisa em regime de dedicação exclusiva.

Fazer parte do GPRH é um orgulho, uma benção e uma alegria. Agradeço aos amigos que já foram e aos presentes.

Agradeço ao Coral da UFV, que encheu de melodia e alegria o meu doutorado. Agradeço também à Madoninha, minha cachorrinha, que tantas vezes deitava do meu lado enquanto eu estudava. Me fazia bem!

BIOGRAFIA

NÍVIA CARLA RODRIGUES, filha de José Lourival Rodrigues e Maria da Conceição Ap. F. Rodrigues, nasceu em Viçosa/ MG em 26 de maio de 1986.

Em janeiro de 2010, concluiu o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Em março de 2011 iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola na área de Hidroclimatologia, na Universidade Federal de Viçosa - UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em março de 2013.

Em abril de 2013 iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na área de Gestão e planejamento de recursos hídricos, na Universidade Federal de Viçosa - UFV, submetendo-se à defesa da tese em março de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. DISPONIBILIDADE HÍDRICA: PANORAMA GERAL.....	3
2.2. RESERVATÓRIOS DE REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES	4
2.2.1. Dimensionamento de reservatórios	5
2.2.2 Disponibilidade de dados fluviométricos para o dimensionamento de reservatórios	8
2.2.2.1. Regionalização de vazões por métodos modelo- dependentes.....	9
2.2.2.2. Regionalização de vazões por métodos modelo- independentes.....	11
2.3. ÍNDICES ESTATÍSTICOS DE DESEMPENHO PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RESERVATÓRIOS	13
3. METODOLOGIA.....	16
3.1. GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES EM LOCAIS NÃO MONITORADOS.....	16
3.2. DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO UTILIZANDO AS SÉRIES SINTÉTICAS	18
3.2.1. Determinação da capacidade do reservatório sem a associação com o período de retorno	18
3.2.2. Determinação da capacidade do reservatório com a associação do período de retorno	18
3.3. OUTRAS METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE RESERVATÓRIOS EM LOCAIS SEM MONITORAMENTO FLUVIOMÉTRICO	20
3.3.1. Regionalização da curva de regularização (RCReg).....	20
3.3.2. Regionalização da capacidade do reservatório (RCRes)	20

3.4. AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS DE GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS E DAS METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE RESERVATÓRIOS	21
3.4.1. Aplicação da validação cruzada para avaliar as metodologias de geração das séries sintéticas de vazões	22
3.4.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios por índices estatísticos	22
3.4.4.1. Índice de Nash-Sutcliffe modificado (E_1)	23
3.4.4.2. Desenvolvimento de um índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD).....	24
3.5. ESTUDO DE CASO	25
3.5.1. Dados fluviométricos.....	25
3.5.2. Demanda fixa.....	26
3.5.3. Demanda variável.....	26
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1. SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES GERADAS E SUA ANÁLISE	29
4.2. DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO UTILIZANDO AS SÉRIES SINTÉTICAS E SUA COMPARAÇÃO COM OUTRAS METODOLOGIAS	34
4.2.1. Dimensionamento da capacidade do reservatório por diferentes metodologias considerando demanda fixa	34
4.2.1.1. Análise preliminar dos dados	34
4.2.1.2. Capacidades de reservatório geradas pelas diferentes metodologias: exemplo numérico para uma seção da hidrografia	35
4.2.1.3. Análise conjunta das capacidades de reservatórios geradas para as 14 seções da hidrografia.....	39
4.2.1.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios.....	43
4.2.2. Dimensionamento da capacidade do reservatório por diferentes metodologias considerando demanda variável	47
4.2.2.1. Análise preliminar dos dados	47

4.2.2.2. Capacidades de reservatório geradas pelas diferentes metodologias: exemplo numérico para uma seção da hidrografia	48
4.2.2.3. Análise conjunta das capacidades de reservatórios geradas para as 14 seções.....	52
4.2.2.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios.....	54
5. CONCLUSÕES.....	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE	72

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

r^2	Coeficiente de determinação
A_{SI}	Área de contribuição da seção de interesse
CR	Capacidade do reservatório
CRs	Capacidades do reservatório
d	Índice de concordância de Willmott
D	Demanda
d_1	Índice de concordância de Willmott modificado
d_r	Índice de concordância de Willmott refinado
Ds	Demandas
E	Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe
E_1	Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe modificado
EF	Estação fluviométrica
ER	Erro relativo
f	Fator de conversão
FDP	Função de densidade de probabilidade
IQD	Índice de qualidade de dimensionamento
MDA	Máximo déficit acumulado
MDAM	Máximo déficit acumulado modificado
MSO_T	Estimativa da capacidade do reservatório baseada na série de dados observados considerando período de retorno
MSSo	Estimativa da capacidade do reservatório baseada na metodologia de geração da SSo
MSSo_T	Estimativa da capacidade do reservatório baseada na metodologia de geração da SSo considerando período de retorno
MSSr	Estimativa da capacidade do reservatório baseada na metodologia de geração da SSr
MSSr_T	Estimativa da capacidade do reservatório baseada na metodologia de geração da SSr considerando período de retorno
Oi	Dado observado
Peq_{750}	Vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 mm
Pi	Dado estimado
Q_{mit}	Vazão média de longo termo
q_{mit}	Vazão média de longo termo específica
q_{mitEF}	Vazão média de longo termo específica na estação fluviométrica
q_{mitSI}	Vazão média de longo termo específica da seção de interesse
$Q_{SI,d}$	Vazão na seção de interesse no dia d
RCReg	Regionalização da curva de regularização
RCRes	Regionalização da capacidade do reservatório
RCRes_T	Regionalização da capacidade do reservatório considerando período de
RHH	Região hidrologicamente homogênea
RHHs	Regiões hidrologicamente homogêneas
SI	Seção de interesse
SO	Série histórica de vazões observadas
SSo	Série sintética de vazões diárias obtida utilizando a q_{mit} observada em cada estação fluviométrica

SSr	Série sintética de vazões diárias obtida utilizando a q_{mit} regionalizada em cada estação fluviométrica
T	Período de retorno
Ts	Períodos de retorno
β	Fração da vazão média a ser regularizada
\bar{X}	Média dos valores de volumes de déficits acumulados
s	Desvio padrão

RESUMO

RODRIGUES, Nívia Carla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2017. **Dimensionamento da capacidade de reservatórios de regularização de vazões utilizando de séries sintéticas**. Orientador: Fernando Falco Pruski.

O aumento da demanda e a diminuição da disponibilidade hídrica provoca quadros de escassez, o que pode ocasionar conflitos entre os usuários. O uso da disponibilidade potencial dos recursos hídricos, representada pela vazão média de longo termo, é possibilitado pela construção de reservatórios de regularização de vazões e constitui uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem. Todavia, apesar de trazer muitos benefícios, pode causar impactos negativos na área econômica, ambiental e social, e por isso, tais obras devem ser dimensionadas de modo a proporcionar os benefícios requeridos e causar o mínimo possível de impactos negativos. Para estimar a capacidade do reservatório são necessários os dados fluviométricos na seção de interesse, mas muitas vezes essas informações são ausentes e/ou deficientes e as técnicas disponíveis para contornar o problema são inadequadas, como a regionalização da curva de regularização. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver, em seções sem disponibilidade de dados fluviométricos, dimensionar a capacidade de reservatórios utilizando séries sintéticas e aperfeiçoar o processo de avaliação da eficácia das metodologias que estimam a capacidade do reservatório nessas seções. As metodologias propostas se baseiam na geração de séries sintéticas de vazões a partir de dados de estações fluviométricas localizadas na mesma região hidrologicamente homogênea da seção de interesse. Os dados utilizados são os valores diários de vazão e a vazão média de longo termo específica (q_{mt}). Foram propostas duas abordagens para a geração das séries sintéticas: i) utilizando a q_{mt} regionalizada, e, ii) utilizando a q_{mt} observada. Assim, quando se utiliza valores diários de vazão observados e q_{mt} regionalizada, obtêm-se a série sintética regionalizada (SSr) e quando se utiliza valores diários de vazão observados e q_{mt} observada, obtêm-se a série sintética observada (SSo). De posse de

ambas as séries sintéticas, as capacidades dos reservatórios foram calculadas e comparadas com os resultados obtidos por outras metodologias já existentes. Diante dos resultados obtidos se chegou às seguintes conclusões: o uso de séries sintéticas de vazões se caracterizou como um procedimento eficiente para o dimensionamento de reservatórios de regularização de vazões; a metodologia de regionalização da curva de regularização foi a que apresentou o pior desempenho entre as metodologias analisadas; a metodologia proposta MSSo_T, a qual utiliza a SSo, foi a que apresentou o melhor desempenho, seguida pela metodologia MSSr_T, que utiliza a SSr; o índice de qualidade de dimensionamento (IQD), proposto neste trabalho como um aperfeiçoamento da avaliação da eficácia das metodologias, constitui em um critério de decisão importante, sendo um fator de incentivo à garantia da segurança hídrica.

ABSTRACT

RODRIGUES, Nívia Carla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2017. **Determination of reservoir capacities for streamflow regulation based on the use of synthetic flow series.** Adviser: Fernando Falco Pruski.

The increase in demand and the reduction of water availability causes water scarcity, which can lead to conflicts among users. The use of the potential water availability, represented by long-term average streamflow, is possible by the construction of reservoirs for regulation streamflow, which may be a viable alternative to increase water availability during drought periods. However, despite their benefits, the reservoirs can cause negative impacts in the economic, environmental and social areas, therefore, such infrastructures must be dimensioned to provide the required benefits and cause the minimum possible negative impacts. To estimate reservoir capacity, the historical streamflow data is needed; however, these data are not always available for sites of interest and the techniques used to solve the problem are inadequate, such as the regionalization of reservoir capacity-yield curves. In this sense, the objectives of this work were to develop methodologies to design reservoir capacity, in sections without historical streamflow data, based on synthetic streamflow series, and also to improve the process of evaluating the efficiency of the methodologies to estimate the reservoir capacity in sections without data. The proposed methodologies are based on the generation of synthetic streamflow series from the historical streamflow data in sections located in a hydrologically homogeneous region. The data used are the daily streamflow values and the specific long-term average streamflow (q_{mlt}). Two approaches were proposed for the generation of the synthetic series: i) using the regionalized q_{mlt} , and ii) using the observed q_{mlt} . Thus, when using daily values of observed streamflow and regionalized q_{mlt} , we obtain the regionalized synthetic series (SSr) and when using daily values of observed streamflow and observed q_{mlt} , we obtain the observed synthetic series (SSo). With both synthetic series, the capacities of the reservoirs were calculated and then compared with the results obtained by existing methodologies. The obtained

results allows the following conclusions: the use of synthetic streamflow series was characterized as an efficient procedure for the reservoirs design; the regionalization of reservoir capacity-yield curves methodology presented the worst performance among the analyzed methodologies; the proposed MSSo_T methodology, which uses the SSo, presented the best performance, followed by the MSSr_T methodology, that uses the SSr; the design quality index (IQD), proposed in this work as an improvement of the methodologies effectiveness evaluation, constitutes an important decision criterion, being an incentive factor to guarantee water security.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida e sua disponibilidade, em quantidade e qualidade, afeta a vida das populações. A irregularidade espacial e temporal da sua distribuição, aliada ao aumento da densidade populacional, faz com que, em algumas regiões, a demanda seja maior que a disponibilidade.

No futuro, é esperado uma maior pressão sobre os recursos hídricos na medida em que crescem as concentrações urbanas, o uso industrial e também as áreas irrigadas – haja vista a necessidade de aumentar a produção agrícola em 70% até 2050 para alimentar a população continuamente em expansão (Bruinsma, 2009). Além disso, as mudanças climáticas deverão tornar esse cenário ainda mais desafiador pelo aumento na frequência de eventos extremos (secas e inundações), que em alguns casos, podem reduzir a disponibilidade de água.

Todas essas questões tendem a gerar situações de conflito pelo uso da água, fazendo-se necessária a adoção de ações que visem a compatibilização entre oferta e demanda, minimizando dessa forma os conflitos. Dentre as ações para melhorar a gestão dos recursos hídricos, destaca-se a construção de reservatórios de regularização das vazões.

Apesar dos benefícios que a construção de reservatórios pode gerar, são cada vez mais frequentes os questionamentos acerca da sustentabilidade dessas estruturas. Os serviços de fornecimento de água, geração de energia hidrelétrica, e irrigação, antes vistos como suficientes para justificar essas obras de infraestrutura, principalmente nos últimos 30 anos, começam a ser contestados frente aos potenciais impactos negativos que podem causar, no âmbito econômico, ambiental e social. Nesse sentido, deve-se buscar, na construção de reservatórios, um balanço favorável entre os impactos positivos e negativos envolvidos. Essa tarefa implica na adoção de metodologias mais assertivas o quanto possível na etapa de dimensionamento.

O dimensionamento desses reservatórios requer o conhecimento das vazões afluentes, sendo uma condição favorável aquela em que se dispõe de uma série histórica de dados fluviométricos, suficientemente longa e representativa. Todavia, essa não é uma realidade frequente, sobretudo nas pequenas bacias hidrográficas, que muitas vezes não dispõem de nenhum registro fluviométrico.

A metodologia mais frequentemente indicada na literatura para dimensionar reservatórios em locais sem dados fluviométricos é a regionalização da curva de regularização, em decorrência de sua fácil aplicação. Entretanto, esta metodologia apresenta limitações como o fato de considerar somente uma demanda fixa no tempo e de apresentar simplificações na estimativa da capacidade do reservatório pela impossibilidade de associá-la a um fator de frequência, o que é inadequado, uma vez que a magnitude de um evento de seca é relacionada a uma frequência de ocorrência.

Outra questão que deve ser considerada no dimensionamento de reservatórios é a análise estatística na fase de avaliação de uma metodologia. Diversos critérios de eficiência são utilizados para fornecer uma avaliação da proximidade dos dados simulados com os observados, todavia, na maioria destes, não há uma diferenciação entre subestimativas e superestimativas. Especificamente para o caso de dimensionamento de reservatórios, salvo as devidas proporções, subestimativas são mais prejudiciais que superestimativas, uma vez que, nestes casos, o projeto não cumpre seu objetivo primordial que é atender a demanda.

Visando contribuir para a melhoria do processo de dimensionamento de reservatórios de regularização de vazões em locais não monitorados, o presente trabalho se propôs a:

- desenvolver, em seções sem disponibilidade de dados fluviométricos, metodologia para o dimensionamento da capacidade de reservatórios baseada na utilização de séries sintéticas de vazões e,
- aperfeiçoar o processo de avaliação da eficácia das metodologias que estimam a capacidade do reservatório nessas seções.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Disponibilidade hídrica: panorama geral

O crescimento econômico e o aumento da riqueza individual alteraram os padrões de consumo humano. Além do aumento da demanda de água para abastecimento público, hidroeletricidade e indústrias, intensificou-se também o uso deste recurso na produção de alimentos, diante da transformação da dieta humana, de um predomínio do amido em direção à carne e aos laticínios. Produzir um quilo de cereais, por exemplo, requer cerca de 1.600 litros de água, enquanto que um quilo de carne bovina pode requerer até 15.000 litros (Hoekstra; Mekonnen, 2012).

No Brasil, o reflexo dessa realidade é evidenciado no aumento na retirada total de água dos rios, que passou de $1.842 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2006 para $2.373 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2010, um acréscimo de 29%. Quando considerada a vazão consumida, ou seja, a diferença entre a vazão retirada e a vazão de retorno aos rios, a irrigação foi responsável, em 2010, por 72% do uso, seguida pela dessedentação animal (11%), uso urbano (9%), industrial (7%) e uso da população rural (1%) (ANA, 2012). Esse quadro deverá se intensificar no futuro, tendo em vista que, até 2050, a agricultura precisará produzir globalmente 70% a mais de alimentos (WWAP-UNESCO, 2015).

Esse aumento na demanda pela água, aliado ao caráter irregular da distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos, tende a gerar situações de incompatibilidade entre oferta e demanda, mesmo em um país como o Brasil, que detém a maior reserva de água doce disponível do planeta. Quanto à irregularidade na distribuição geográfica da água, por exemplo, sabe-se que 80% deste recurso está concentrada na Região Hidrográfica Amazônica, que abriga pouco mais de 5% da população brasileira, enquanto que na Região

Hidrográfica do Atlântico Leste, onde se localizam quase 8% da população, por exemplo, estão menos de 0,4% das águas dos rios (ANA, 2012). Outro exemplo é a bacia do São Francisco, que, com o dobro da população da bacia amazônica, dispõe de apenas 2% da água doce (Setti et al., 2001).

Essa combinação de baixa disponibilidade e alta demanda por recursos hídricos pode resultar em quadros de escassez hídrica e, eventualmente, levar a situações de conflitos entre os usuários de água. Esta não é uma situação recente no Brasil e vem se agravando ao longo do tempo em algumas regiões. A sub-bacia do rio Paracatu, por exemplo, localizada na bacia do rio São Francisco, é um exemplo de região que já apresenta esse tipo de problema. A disputa pela água começou a partir da década de 1970, quando houve a expansão da área irrigada sem a prévia quantificação do volume possível de ser utilizado (Ramos; Pruski, 2003), e vem se agravando desde então pelo aumento do consumo de água, movido diretamente pelo crescimento populacional e aumento da renda per capita (Rodriguez et al., 2007). Há que se considerar ainda o agravamento dessa situação diante das previsões de aumento de eventos extremos de seca, que diminuirão as vazões mínimas na maioria das regiões do planeta (Mello et al., 2008).

Para contornar esse problema, é imprescindível uma melhoria na gestão dos recursos hídricos a partir de um conjunto de ações tais como: a quantificação da disponibilidade dos recursos hídricos (Rodrigues, 2013; Molina et al., 2014); a implementação de ações para conservação do solo e da água (Tucci et al., 2000); a compatibilização de critérios para o estabelecimento das vazões máximas permissíveis de outorga (Bof et al., 2012); o uso de vazões mínimas como índice de referência para outorga (Oliveira et al., 2013); a otimização da água pela agricultura irrigada (Coelho et al., 2005; Christofidis, 2008); e por fim, a construção de reservatórios para regularização de vazões, foco do presente estudo.

2.2. Reservatórios de regularização de vazões

Os reservatórios desempenham um importante papel na gestão dos recursos hídricos dado que possibilitam o acúmulo de reservas durante o período chuvoso para compensar as deficiências no período de estiagem, exercendo assim um efeito regularizador da vazão nos cursos d'água. São

tidos como importantes dispositivos na promoção de um desenvolvimento mais sustentável (GUO et al., 2004; LI et al., 2010) e seus benefícios à sociedade abrangem o controle de inundações e o armazenamento de água para hidroeletricidade, abastecimento público, indústrias e agricultura (Biemans et al., 2006).

Os impactos dessas estruturas no aumento da disponibilidade hídrica a nível global, continental e de bacia foram estimados por Biemans et al. (2011). Ludwig et al. (2009) encontraram para alguns países africanos, uma correlação entre a capacidade de armazenamento de água do país e o seu desenvolvimento econômico. Esse desenvolvimento também é relatado no entorno do reservatório de Aslantas, localizado na Turquia, onde o aumento da renda familiar proporcionado pela agricultura irrigada possibilitou aos agricultores oferecer aos filhos educação escolar de melhor qualidade. Efeitos similares são relatados também para o Egito, Tunísia e no Sri Lanka (WCD, 2000).

Ao mesmo tempo em que proporcionam muitos benefícios, reservatórios podem causar impactos negativos ambientais, sociais e econômicos, tais como o deslocamento de populações, a interferência no ciclo de vida e habitat de organismos aquáticos e a eutrofização das águas (Vorosmarty et al., 2003; Biemans et al., 2006). Dessa forma, devem ser bem planejados de modo que as finalidades para os quais foram concebidos sejam atendidas. Adicionalmente, deve-se assegurar que os reservatórios proporcionem um uso múltiplo e satisfatório, de modo que se minimize os impactos negativos.

2.2.1. Dimensionamento de reservatórios

Para assegurar os benefícios advindos da construção dos reservatórios, estes devem ser dimensionados de modo a atender a demanda requerida e possibilitar o uso de água a jusante. Normalmente, o dimensionamento de reservatórios é baseado nos registros históricos de vazões do rio (Cosser, 2011) por meio da utilização de métodos, que segundo Yevjevich (1967), podem ser classificados como analíticos, experimentais e empíricos.

Classificam-se como analíticos os métodos que assumem que os deflúvios seguem uma dada lei de probabilidade (log-normal, gama, entre outros) e dimensionam os reservatórios por meio de cálculos analíticos. A

principal limitação desses métodos é a impossibilidade de lidarem com regras de operação complexas.

Os métodos experimentais, por sua vez, também admitem que os deflúvios seguem uma certa lei de probabilidade, mas geram séries sintéticas temporais de vazões através de modelos estocásticos e executam a operação simulada do reservatório. Para esses métodos, a própria capacidade do reservatório para atender, com uma dada garantia uma demanda, é uma variável aleatória.

Apesar de muitos trabalhos ressaltarem a importância da utilização de modelos estocásticos na geração de séries sintéticas (Koutsoyiannis, 2005a; 2005b; Jain; Bhunya, 2008; Fill; Neira, 2008; Gomide, 2012; Fayaedet al., 2013), há fatores que podem induzir a erros nessas estimativas, como a não preservação das peculiaridades do processo hidrológico (sazonalidade, persistência de longo período, assimetria, intermitência, variação espacial).

A consideração da natureza estocástica do regime de vazões aumenta a complexidade da estimativa do volume a ser armazenado (Sattari et al., 2009; Fayaed et al., 2013). Modelos estocásticos devem preservar a dependência temporal (mensais e anuais) das séries históricas, o que não é uma tarefa trivial, tendo em vista que as séries sintéticas são geradas em base anual e, em seguida, desagregadas em base mensal, o que pode representar perda de informações contidas nos dados sazonais (Coser, 2011). Quanto mais refinada a escala (em base diária, por exemplo), mais estes modelos falham em simular a sazonalidade das séries, devido ao efeito das estações do ano (Koutsoyiannis, 2005b). O fato de não respeitarem as peculiaridades do processo hidrológico dificulta a escolha do modelo, que é feita em detrimento da consideração de uma das peculiaridades (Koutsoyiannis, 2005b).

Dada a complexidade dos métodos estocásticos, muitos estudos ainda utilizam métodos empíricos, sendo pouco comum a associação entre métodos analíticos e experimentais (Campos, 2005). Métodos empíricos são relacionados ao estudo de períodos críticos da série histórica. Um exemplo é o método das diferenças acumuladas ou máximo déficit acumulado (MDA) que, mesmo simples, pode chegar a resultados relevantes. Esse método se baseia no conceito de período crítico, definido quando há convergência entre a maior demanda e menor oferta de água. Considerando vários períodos críticos, o mais crítico resultará no maior volume de água a ser armazenado (Oguz;

Bayazit, 1991; Aksoy, 2001; Silva et al., 2013). A capacidade do reservatório, por sua vez, é obtida pela diferença entre o volume necessário para atender a vazão requerida no período mais crítico e o volume que aflui no reservatório durante o mesmo período.

Quando se utiliza somente a série histórica de dados para estimar a capacidade de um reservatório, a premissa é que seja representativa do regime hidrológico do rio, ou seja, admite-se comportamento semelhante do rio durante a vida útil da obra. Além disso, os seguintes aspectos devem ser considerados: a série histórica é a única fonte autêntica de informação; as séries simuladas estocasticamente não substituem os registros históricos; e a geração de séries sintéticas não adiciona nenhuma informação que não seja a extensão dos dados históricos (Koutsoyiannis, 2005b).

Como o dimensionamento de reservatórios baseado em registros de dados históricos gera uma única estimativa da capacidade, tal metodologia não fornece uma medida de risco (Xu et al., 1997). Para resolver essa limitação, Nunes e Pruski (2015a) associaram a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno), através da aplicação da distribuição probabilística de Gumbel à série dos volumes gerados pelo método das diferenças acumuladas. Ao desenvolver um arranjo de possibilidades, por meio da utilização de diferentes períodos de retorno, o projetista pode escolher a melhor opção dentre os riscos associados (Pegram et al., 1980; ASCE, 1996; Koutsoyiannis, 2005c).

A associação de um risco e, conseqüentemente, de uma confiabilidade à capacidade do reservatório é um ganho de informação. A determinação da confiabilidade e do risco, no que diz respeito ao dimensionamento, é extremamente importante devido às incertezas inerentes aos sistemas hidrológicos (Vogel; Bolognese, 1995; Wurbs, 2004; Jain; Bhunya, 2010). A confiabilidade de um reservatório é a probabilidade da demanda ser menor que o volume armazenado mais as entradas líquidas, ou, a probabilidade do sistema encontrar-se em um estado satisfatório (Pegram et al., 1980; ASCE, 1996; Koutsoyiannis, 2005c). O complemento da confiabilidade é o risco, que se caracteriza como a probabilidade de que a capacidade estimada do reservatório não atenda à demanda futura (ASCE, 1996).

2.2.2 Disponibilidade de dados fluviométricos para o dimensionamento de reservatórios

Um dos fatores determinantes para um satisfatório dimensionamento de reservatórios de regularização de vazões é o conhecimento da disponibilidade hídrica de um local. Uma condição favorável seria aquela em que esse dimensionamento fosse baseado em extensas séries históricas de vazões. Todavia, em muitos locais não há dados em quantidade suficiente, e muitas vezes, não se dispõe de nenhum dado, por se tratar de seções não-monitoradas (Post et al., 1998; Chiang et al., 2002; Yadav et al., 2007).

Segundo Mishra e Coulibally (2009), além de muitos locais não terem estações fluviométricas, há uma tendência mundial de diminuição do número daquelas que já existem. As razões para tal são variadas como financiamento insuficiente, quadros institucionais inadequados, falta de valorização dos dados hidrológicos de longo prazo e, em alguns casos, turbulência causada por guerras e outras catástrofes. As regiões afetadas incluem muitas partes da África, América Latina e Ásia (WMO, 1996).

A falta de dados hidrológicos é tão relevante, que em 2003, a IAHS (International Association of Hydrological Sciences) deu início à “Década IAHS 2003-2012”, um programa mundial na busca por avanços nos estudos de predição hidrológica em bacias sem monitoramento (Sivaplan et al., 2003; Razavi; Coulibaly, 2013; Pomeroy et al., 2013; Spence et al., 2013). Esse programa ficou conhecido como PUB (Prediction in Ungauged Basins).

Diante do problema da falta de dados hidrológicos, principalmente de dados de vazões, é necessário utilizar metodologias que possibilitem a geração das informações requeridas (Pinheiro; Naghetinni, 2007). Nesse sentido, a utilização da regionalização de vazões pode ser uma alternativa, pois é uma técnica utilizada para suprir a falta de informações hidrológicas em locais com pouca ou nenhuma disponibilidade de dados (Pandey; Nguyen, 1999; Sivapalan et al., 2003; Laaha; Blöschl, 2006; Rao; Srinivas, 2006; Young, 2006; Cutore et al., 2007; Yadav et al., 2007; Masih et al., 2010; Samuel et al., 2011).

A regionalização pode ser utilizada para obtenção de variáveis, séries, indicadores, funções tais como a curva de probabilidade de vazões máximas, curva de permanência e curva de regularização, ou parâmetros de um modelo hidrológico (Tucci, 1993; Obregon et al., 1999, Castellarin et al., 2007).

Os métodos de regionalização podem ser divididos em dois grupos: i) regionalização de índices (vazões mínimas, médias e porcentagens da permanência da vazão no tempo) e ii) estimativa de séries sintéticas espaciais contínuas (He et al., 2011; Shoib et al., 2013).

A regionalização da curva de regularização é uma metodologia que estima a capacidade de reservatórios (CR) em locais não-monitorados. É um procedimento alternativo que visa à obtenção da curva de regularização do local sem monitoramento através da utilização das vazões disponíveis em locais monitorados. A curva de regularização relaciona a vazão garantida, com uma determinada probabilidade, e o volume de regularização necessário para garantir a demanda (Domokos e Gilyén-hofer, 1990; Tucci, 1993; Obregon et al., 1999).

É a metodologia mais frequentemente indicada na literatura para estimar a CR em locais sem dados fluviométricos (Domokos; Gilyén-hofer, 1990; Maidment, 1992; ASCE, 1996; Obregon et al., 1999) em decorrência de sua fácil aplicação. Entretanto, apresenta limitações, como o fato de considerar somente uma demanda fixa no tempo, e apresentar simplificações na estimativa da CR pela impossibilidade de associá-la a um período de retorno (T).

No entanto, para o dimensionamento de reservatórios, a regionalização de séries contínuas é mais indicada, principalmente quando se considera uma demanda variável no tempo. Ela pode ser realizada por meio de dois métodos: modelo-dependente e modelo-independente (Razavi; Coulibaly, 2013).

No caso do método modelo-dependente, os parâmetros do modelo são utilizados como meios para transferir informações hidrológicas de bacias monitoradas para as não-monitoradas. No método modelo-independente, as vazões são transferidas diretamente através de métodos orientados para gerar a série sintética de vazões (Hundecha; Bardossy, 2004; Götzinger; Bardossy, 2006).

2.2.2.1. Regionalização de vazões por métodos modelo-dependentes

De acordo com uma revisão nos estudos de regionalização contínua de vazões, realizado por Razavi e Coulibaly (2013), cuja abrangência se deu em trabalhos publicados entre 1990 e 2011, a maioria utilizou modelos chuva-

vazão. Exemplos podem ser encontrados em Jin et al. (2009); Bocchiola et al. (2010); Castiglioni et al. (2010); Samuel et al. (2011) e Bulygina et al. (2011).

Um modelo é uma representação ou interpretação simplificada da realidade, ou seja, são aproximações realizadas para melhor entender um determinado fenômeno (Pavan et al., 2009). Entretanto, os modelos hidrológicos possuem limitações básicas como a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade em definir todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos (Tucci, 1993).

Estudos de regionalização que utilizam modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são considerados desafiadores por dois motivos: primeiro pela falta de dados para calibrar os parâmetros dos modelos, que acaba por limitar o sucesso da simulação (Sivapalan et al., 2003; Oudin et al., 2008; Stoll; Samuel et al., 2011); e segundo, por causa da grande variação das características hidrográficas entre as regiões, que podem acarretar em resultados diferentes mesmo utilizando a mesma metodologia de regionalização (Oudin et al., 2008).

Modelos hidrológicos podem ser classificados em físicos e conceituais. Modelos físicos descrevem a distribuição mecânica dos processos hidrológicos. São adequados para estudar os efeitos das mudanças de uso da terra e erosão do solo, porque os seus parâmetros são baseados em medições de campo. No entanto, não representam bem os processos físicos, especialmente devido a heterogeneidade e complexidade dos fluxos da água no campo (Bloschl; Sivapalan, 1995; Sivapalan, 2003), além de exigirem um número grande de parâmetros. Como tal abordagem é intensiva no requerimento de dados, não é apropriada em regiões não-monitoradas (Razavi; Coulibaly, 2013).

Modelos conceituais, por outro lado, são bem conhecidos, e sua exigência de dados é moderada. Eles fornecem representações simplificadas de processos hidrológicos (Dawson; Wilby, 2001). Porém sua base conceitual limita a capacidade de lidar com mudanças no clima e uso do solo, e outras mudanças dinâmicas que ocorrem em bacias hidrográficas. Isto deve-se ao fato de que eles só executam razoavelmente bem quando a calibração é realizada com base em dados passados, que podem não refletir as condições futuras (He et al., 2011). Além disso, os parâmetros do modelo são derivados

de atributos físicos das bacias, que podem estar associados a altos níveis de incerteza (Bulygina et al., 2011).

O impacto da incerteza na previsão das vazões simuladas por modelos hidrológicos no resultado final do dimensionamento de reservatórios raramente é avaliado, provavelmente devido à falta de uma estrutura robusta para quantificar as incertezas. Este continua a ser um dos principais desafios a ser superado na ciência hidrológica (Thyer et al., 2008).

2.2.2.2. Regionalização de vazões por métodos modelo-independentes

Modelos hidrológicos, apesar de bastante difundidos, requerem muitos dados, o que limita sua utilização em regiões não-monitoradas. Já a regionalização de séries contínuas baseadas em métodos modelo-independente apresenta um grande potencial de uso tendo em vista sua simplicidade e menor requerimento de dados.

Mais recentemente, estimativas baseadas no método modelo-independente têm sido realizadas com grande potencialidade na predição de vazões contínuas, e como alternativa ao uso de modelos chuva-vazão, principalmente quando não se tem dados disponíveis para aplicação de um modelo hidrológico. Trabalhos como os de Yadav et al. (2007), Buttle e Eimers (2009), Besaw et al. (2010), Lima e Lall (2010) e Parada e Liang (2010) ilustram o uso dessa metodologia. Uma das vantagens desse método é o menor requerimento de dados.

A transferência de dados pode ser realizada por meio de três técnicas: análise de regressão (Goswami et al., 2007; Besaw et al., 2010); Parada; Liang 2010), modelos de séries temporais (Chiang et al., 2002a; Mohamoud, 2008; Isik; Singh, 2008), e relações de escala (Buttle; Eimers, 2009; Woo; Thorne 2003; Lima; Lall, 2010).

Na técnica de análise de regressão estão incluídas a regressão linear e não linear, como as redes neurais artificiais (RNAs). A maioria dos processos hidrológicos que ocorrem na natureza são não-lineares e, em muitos casos, sua modelagem a partir de modelos físicos ou conceituais pode ser limitada por uma má compreensão das complexas interações envolvidas no processo. Nesses casos, as RNAs são vistas como uma alternativa, pois têm a capacidade de extrair uma relação não linear dos dados (Zhang et al., 1998).

Heuvelmans et al. (2006) compararam a análise de regressão linear e RNAs para regionalizar os parâmetros do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), que foi utilizado para simular a vazão diária em 25 bacias belgas. Eles observaram que ao utilizar RNAs, as estimativas de vazões apresentaram maior acurácia em relação ao uso da regressão linear. Entretanto, tal comportamento só foi verificado para valores das características físicas que se encontravam dentro do intervalo utilizado na construção das RNAs. Em casos de extrapolação dos valores, a regressão linear apresentou melhores resultados. Embora a forma linear de regressão dificilmente represente a realidade hidrológica, ela alcança bons resultados e é mais fácil de ser manipulada (Parajka et al., 2005; Bárdossy, 2007).

Segundo ASCE (2000), uma característica atrativa das RNAs é sua capacidade de extrair a relação entre as entradas e saídas de um processo, mesmo sem uma relação explícita entre eles. Porém, algumas RNAs são consideradas abordagens “caixa-preta”, onde as soluções para um problema são geradas automaticamente. A RNA fornece uma previsão de resposta do sistema, mas não a compreensão das interações que geram a ocorrência do evento hidrológico, o que torna sua aplicação difícil para usuários não familiarizados (Maier; Dandy, 2000; Yitian; Gu, 2003; Kingston et al., 2005).

Na técnica de modelos de séries temporais, de acordo com Bayer e Souza (2010), os mais utilizados são os modelos estocásticos ARIMA (autorregressivo integrado de média móvel). Contudo, em estudos hidrológicos é comum encontrar sazonalidade nas séries, o que leva à necessidade de utilizar modelos que incorporem essa característica. Neste contexto, surgem os modelos SARIMA (modelos sazonais autorregressivos integrados de médias móveis) (Chechi; Bayer, 2012). Entretanto, Silva (2005) ressalta que modelos estocásticos, que consideram correlações temporais e sazonais, só produzem bons resultados quando o escoamento na bacia se dá de forma lenta, onde predomina o armazenamento subterrâneo ou a declividade seja baixa.

A técnica de relação de escala explora o potencial de usar relações métricas de vazão e tamanho da bacia para extrapolar dados de bacias monitoradas para não-monitoradas (Yue; Wang, 2004). Uma relação de escala frequentemente examinada é entre vazões e área de drenagem. Segundo Yue e Wang (2004), as vazões mínimas canadenses podem ser bem estimadas utilizando somente relações de escala (vazão/área de drenagem), e que tal

metodologia é recomendada para a extrapolação de dados de bacias monitoradas para não monitoradas.

Apesar de cada técnica apresentar bons resultados individualmente, alguns estudos (Oudin et al., 2008; Samuel et al., 2011, Razavi; Coulibaly, 2013) apontam para a combinação de diferentes métodos para transferir parâmetros de modelos hidrológicos ou de equações.

2.3. Índices estatísticos de desempenho para avaliação da capacidade de reservatórios

Segundo Razavi e Coulibaly (2013), uma etapa importante no processo de regionalização de séries sintéticas contínuas de vazões é a avaliação do desempenho da metodologia empregada, utilizando bacias pseudo-não-monitoradas antes de aplicá-la às verdadeiras bacias não-monitoradas. Nesse sentido, a validação cruzada, método *leave-one-out*, tem sido um dos procedimentos mais utilizados (Parajka et al., 2005; Merz; Blöschl, 2004; Samuel et al., 2011).

De posse das séries sintéticas de vazões, pode-se estimar a capacidade do reservatório e compará-la à capacidade estimada utilizando a série histórica de dados da bacia pseudo-não-monitorada utilizada na validação cruzada. Essa comparação é realizada por meio de índices estatísticos.

Índices estatísticos de eficiência são medidas matemáticas utilizadas por hidrólogos para fornecer uma avaliação da proximidade do comportamento simulado com o observado. Os mais utilizados são o coeficiente de determinação (r^2), o índice de concordância de Willmott (d), e o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E) (Moriasi et al., 2007; Willmott, 1981; ASCE, 1993; Legates; McCabe, 1999).

O r^2 , obtido pela Equação 1, embora seja amplamente utilizado, quantifica apenas a dispersão dos dados, sendo esta uma de suas principais desvantagens, podendo levar a conclusões equivocadas, principalmente quando é o único índice utilizado. Isto ocorre porque, uma metodologia que, sistematicamente, superestima ou subestima os dados, pode resultar em bons valores de r^2 , mesmo se todas as estimativas estiverem erradas (Krause et al., 2005). Tal índice é pobre para mensurar o desempenho de metodologias, pois

uniformiza as diferenças entre dados estimados e observados. Assim, o r^2 é insensível a diferenças entre as simulações e observações do modelo. Altos valores de r^2 podem ser obtidos mesmo quando os valores estimados-observados diferem consideravelmente em magnitude (Legates; McCabe, 1999).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

em que: O_i é o dado observado; P_i é o dado estimado; e, \bar{O} é a média dos valores observados; e \bar{P} é a média dos valores estimados.

O índice de concordância ou Índice de Willmott (Equação 2), representado pela letra d , é uma medida de conformidade entre o estimado e o observado (Willmott, 1981; Legates; McCabe, 1999). É amplamente utilizado quando o objetivo é avaliar o desempenho ou a comparação de diferentes metodologias (Ziegler et al., 2001; Chua; Wong, 2011).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

O índice d representa uma melhoria decisiva sobre o r^2 , pois é sensível a diferenças entre os valores observados e estimados. Todavia, a função quadrática na sua fórmula pode resultar em valores elevados deste índice, mesmo quando não há um bom desempenho da metodologia analisada (Willmott et al., 1985; Legates; McCabe, 1999; Camparotto et al., 2013). Para contornar essa limitação, Willmott et al. (1985) propuseram uma adaptação da equação, o que gerou o índice Willmott modificado (d_1) e mais tarde, uma nova adaptação foi proposta pelos autores, culminando no índice de Willmott refinado (d_r) (Willmott et al., 2012). O d_r varia de -1 a 1, sendo tanto maior a concordância quanto mais próximo de 1, o qual é obtido pela equação

$$d_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (3)$$

quando $\sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|$, e,

$$d_r = \frac{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1 \quad (4)$$

quando $\sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|$ com $c = 2$.

Apesar das modificações, Legates e MacCabe (2013) acreditam que o d_r ainda apresenta limitações, tais como o fato da interpretação de seus valores não ser intuitiva. Adicionalmente, os autores afirmam que d_r é meramente um reescalonamento do índice de Nash e Sutcliffe modificado (E_1).

Outra referência utilizada na avaliação de modelos é o índice E (Equação 5), desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970). Este índice fornece uma informação do quanto os dados estimados se distanciam do valor médio dos dados observados. Os valores de E variam de $-\infty$ até 1, onde $E=1$ indica uma combinação perfeita entre os dados estimados e os observados e $E=0$ indica que a metodologia não acrescenta nenhum poder preditivo. Já um valor negativo demonstra que os valores estimados são inadequados em relação aos observados.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

Como E também apresentava alta sensibilidade a valores extremos, devido às diferenças de quadrados, Legates e McCabe (1999) apresentaram o coeficiente de eficiência modificado (E_1) para reduzir tal efeito, o qual é obtido pela equação

$$E_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (6)$$

Segundo Legates e MacCabe (2013), E_1 constitui uma base mais adequada para a avaliação de metodologias e preferível a muitas outras estatísticas disponíveis, por sua simplicidade e facilidade de interpretação.

3. METODOLOGIA

3.1. Geração de séries sintéticas de vazões em locais não monitorados

A metodologia proposta se baseia na geração de séries sintéticas de vazões em locais não monitorados a partir da utilização de dados de estações fluviométricas localizadas na mesma região hidrologicamente homogênea (RHH) da seção de interesse (local onde se deseja construir o reservatório). Os dados utilizados são os valores diários de vazão e a vazão média de longo termo específica (q_{mlt}).

Foram propostas duas maneiras de gerar as séries sintéticas no que diz respeito à q_{mlt} : i) utilizando a q_{mlt} observada e, ii) utilizando a q_{mlt} regionalizada. A q_{mlt} observada foi utilizada, pois, é o dado real; e, a q_{mlt} regionalizada, pois, segundo Tucci, (2002) dados regionalizados, à medida que exploram melhor as informações disponíveis, podem aprimorar a representatividade dos dados hidrológicos. Assim, quando se utiliza valores diários de vazão observados e q_{mlt} observada, obtêm-se uma série sintética (SSo); e, quando se utiliza valores diários de vazão observados e q_{mlt} regionalizada, obtêm-se outra série sintética (SSr).

A metodologia propõe que a vazão no dia “d” na seção de interesse pode ser estimada a partir do produto da vazão específica no dia “d” de cada estação fluviométrica pela razão entre a q_{mlt} da seção de interesse (dado regionalizado) e a q_{mlt} na seção de controle de cada estação fluviométrica (dado regionalizado ou observado). O valor médio desse produto, considerando todas as estações fluviométricas envolvidas, é então multiplicado pela área de contribuição da seção de interesse (Equação 7).

$$Q_{SI,d} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[q_{EF_i,d} \left(\frac{q_{mlt_{SI}}}{q_{mlt_{EF_i}}} \right) \right]}{n} \right\} A_{SI} \quad (7)$$

em que: $Q_{SI,d}$ é a vazão na seção de interesse no dia d , $m^3 s^{-1}$; d é o dia; n é o número de estações fluviométricas consideradas; $q_{EF_i,d}$ é a vazão específica na estação fluviométrica i no dia d , $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{SI}}$ é a vazão média de longo termo específica na seção de interesse (dado regionalizado), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; $q_{mlt_{EF_i}}$ é a vazão média de longo termo específica na estação fluviométrica i (dado observado ou regionalizado), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; e A_{SI} é a área de contribuição da seção de interesse, km^2 .

Repetindo o procedimento para cada dia durante o período base das estações fluviométricas, a série sintética pode ser construída, em base diária, para o mesmo período, como exemplificado na Figura 1. Todas as estações fluviométricas disponíveis na RHH são utilizadas.

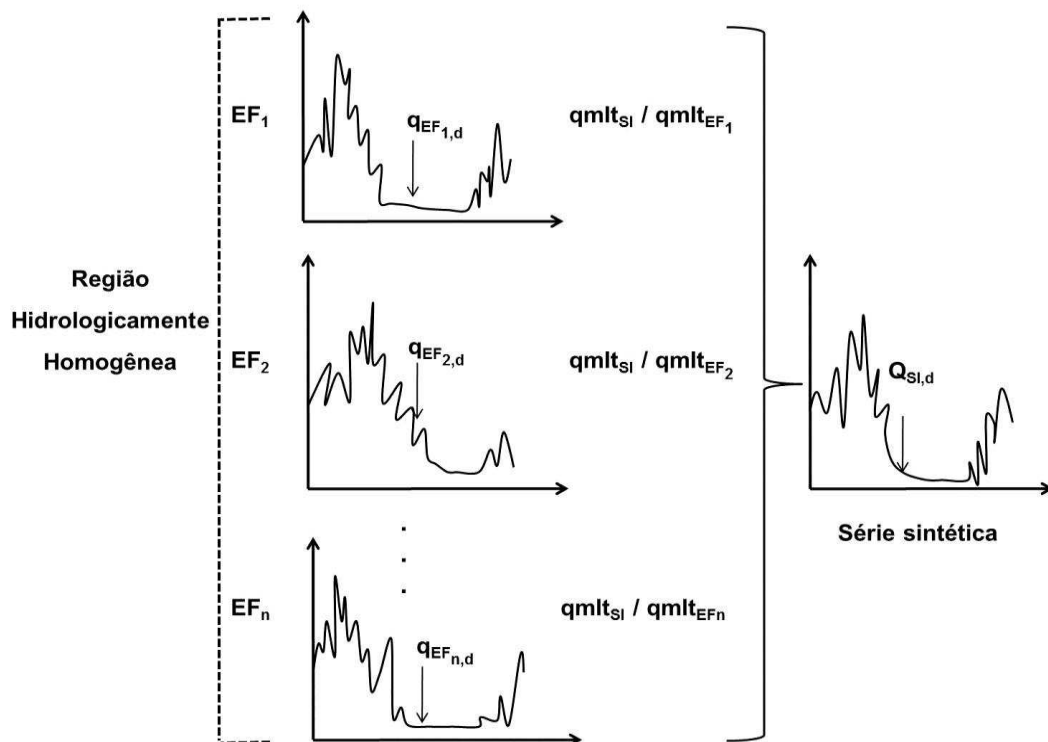


Figura 1. Representação esquemática da obtenção das séries sintéticas de vazões.

A aplicação da metodologia envolve um estudo prévio de regionalização de vazões que defina as RHHs e as equações de regionalização correspondentes à q_{mlt} . É uma metodologia embasada em princípios

hidrológicos aceitos, como a transferência de informações entre locais com comportamento hidrológico semelhante. Não depende de modelos hidrológicos, utiliza poucos dados e é específica para o dimensionamento de reservatórios.

3.2. Dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando as séries sintéticas

3.2.1. Determinação da capacidade do reservatório sem a associação com o período de retorno

O volume de déficit acumulado, obtido pelo método das diferenças acumuladas ou máximo déficit acumulado (MDA) (Lanna, 2012), é dado pelo somatório dos déficits entre a vazão afluyente e a vazão necessária para atender a demanda. Considerando vários períodos de estiagem, o mais crítico resulta no maior déficit acumulado, e por sua vez, na maior CR.

Para cada demanda deve-se analisar se os déficits foram compensados dentro do próprio ano (regra de operação anual) ou se foram transferidos para o próximo (regra de operação plurianual).

Quando a regra de operação adotada é anual, para cada ano se obtém o maior volume de déficit acumulado, e o maior deles resultará na CR adotada. Quando a regra de operação é plurianual, todos os anos da série de dados são analisados conjuntamente, como uma única série.

3.2.2. Determinação da capacidade do reservatório com a associação do período de retorno

Para associar a CR a um T utiliza-se funções de densidade de probabilidade (FDP) (Kite 1988), dadas pela equação

$$CR_T = \bar{x} + k s \quad (8)$$

em que: CR_T é a capacidade do reservatório associada a um determinado período de retorno T (hm^3); \bar{x} é a média dos valores de volumes de déficits

acumulados (hm^3); K é o fator de frequência (adimensional); e s é o desvio padrão dos valores de volumes de déficits acumulados (adimensional).

Quando a regra de operação adotada é anual, para cada ano se obtém o maior volume de déficit acumulado, e assim se obtém n déficits, sendo n o número de anos da série sintética. Para esses n déficits as FDP são aplicadas e a CR associada ao T desejado é obtida.

Quando a regra de operação adotada é plurianual, todos os anos da série de dados são analisados conjuntamente, como uma única série. Assim, quando se aplica o método do MDA se obtém apenas um volume de déficit acumulado, não possibilitando aplicar as FDP. Neste sentido, Nunes e Pruski (2015a) a fim de possibilitar várias estimativas de CR, através de sua associação com o T , desenvolveram o método das diferenças acumuladas modificado (MDAM), o qual foi utilizado.

O MDAM propõe a criação de séries sintéticas temporais a partir da série espacial disponível. Considerando a série histórica de vazões, com período base pré-definido, cria-se um número de séries sintéticas temporais igual ao número de anos do período base menos um. Supondo uma série histórica com período base de 1970 a 2000, a primeira série sintética temporal criada é a partir da realocação do ano de início (1970) para o final da série (após o ano de 2000), passando a ser, agora, o ano de 1971 o primeiro ano da nova série. Este procedimento é repetido até que se chegue à última série possível de ser criada, conforme esquema representado na Figura 2.

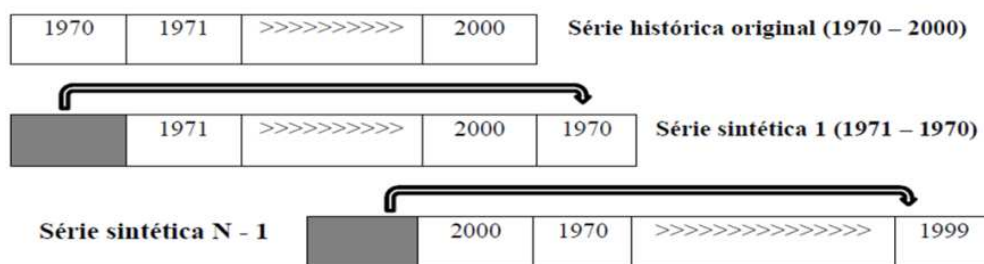


Figura 2. Representação da criação de séries sintéticas temporais pelo MDAM. Fonte: Nunes e Pruski (2015a)

Assim, para cada série sintética temporal, se obtém o maior volume de déficit acumulado. Para esses n déficits a FDP de Gumbel é aplicada e a CR associada ao T desejado é obtida.

Foram realizadas duas adaptações para utilização do método MDAM: no lugar da série histórica foram utilizadas as séries sintéticas espaciais (SSr e SSo) e, foram consideradas outras quatro FDP (Pearson III, Log Pearson III, Log Normal II, e Log Normal III).

3.3. Outras metodologias de estimativa de capacidade de reservatórios em locais sem monitoramento fluviométrico

3.3.1. Regionalização da curva de regularização (RCReg)

Permite estimar a CR no local sem monitoramento a partir da regionalização das curvas de regularização das estações fluviométricas (Domokos e Gilyén-hofer, 1990; Tucci, 1993; Obregon et al., 1999) a partir de uma equação do tipo

$$CR = f a \beta^b Q_{\text{mlt reg}} \quad (9)$$

onde f é o fator de conversão para hectômetros cúbicos (0,0864); a e b são os parâmetros obtidos na regressão (adimensional); β é a fração da vazão a ser regularizada (adimensional); e, $Q_{\text{mlt reg}}$ é a vazão média de longo termo regionalizada para a seção de interesse ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

É necessário o conhecimento da vazão média de longo termo regionalizada para o local onde se deseja construir o reservatório. Esta metodologia não permite a aplicação da demanda variável e nem a associação da CR ao T.

3.3.2. Regionalização da capacidade do reservatório (RCRes)

Ao invés de regionalizar a curva de possibilidades de regularização, regionaliza-se a CR. Uma vez que somente muda a variável a ser regionalizada em relação à RCC, foi encarada como mais uma metodologia e não uma proposição. Possui a vantagem de permitir a associação da RC a um T.

Para cada estação fluviométrica localizada na mesma RHH da seção de interesse, é calculada a RC de acordo com a demanda (D). Essas CRs são

regionalizadas de modo a obter equações de regressão que permitam associar a CR com variáveis topológicas e/ou climáticas.

As variáveis independentes utilizadas na regressão para estimar a CR foram área de drenagem e precipitação, que foram agrupadas em uma única, a Peq_{750} , que é a vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 milímetros. Tal consideração representa uma melhoria nos processos de regionalização (Pruski et al., 2013). Foi utilizada a regressão potencial representada pela equação

$$CR_{T,D} = a Peq_{750}^b \quad (10)$$

$$Peq_{750} = \frac{(P - 750) A}{f} \quad (11)$$

onde $CR_{T,D}$ é a capacidade do reservatório associada ao T e demanda D (hm^3); a e b são os parâmetros obtidos na regressão potencial; Peq_{750} é a vazão equivalente ao volume precipitado menos 750 mm ($m^3 s^{-1}$); P é a precipitação total anual média na área (mm); A é a área de drenagem (km^2); e, k é o fator de conversão (31536).

Foram testadas duas metodologias: uma sem considerar a associação da CR ao T (RCRes), e outra considerando (RCRes_T) (Figura 3).

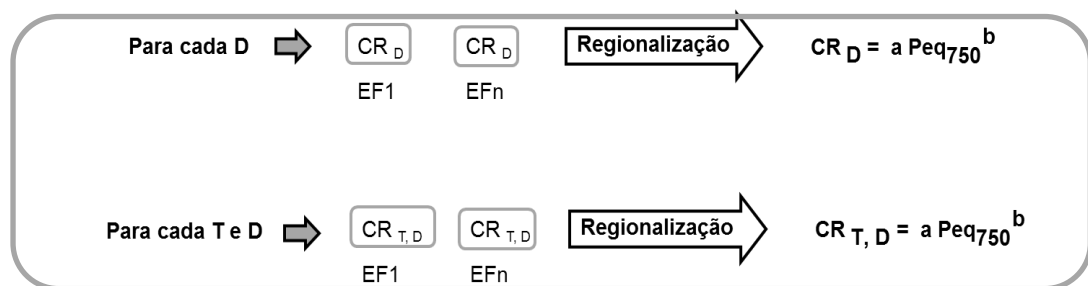


Figura 3. Representação esquemática das metodologias RCRes e RCRes_T.

3.4. Avaliação das metodologias propostas de geração de séries sintéticas e das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios

3.4.1. Aplicação da validação cruzada para avaliar as metodologias de geração das séries sintéticas de vazões

A validação cruzada “*leave-one-out*” foi utilizada para avaliar as séries sintéticas SSr e SSo. Consiste em excluir uma amostra de cada vez para a construção de um novo conjunto sem essa amostra e, assim, estimar o valor da variável dependente (Kirali; Ferreira, 2009).

Nesse processo, cada estação fluviométrica foi, por sua vez, considerada não-monitorada (pseudo-não-monitorada), e, portanto, foi deixada de fora para obtenção da série sintética na seção. Assim, considerando as duas condições de propostas de geração das séries sintéticas, para cada estação pseudo-não-monitorada foram geradas duas séries, a SSr e a SSo.

Para avaliar a q_{mit} das séries sintéticas, estas foram comparadas com a q_{mit} oriunda da série de dados observados (SO). Tal comparação foi realizada por meio do erro relativo (ER) pela equação

$$ER = \left[\frac{(q_{mitSS} - q_{mitSO})}{(q_{mitSO})} \right] \quad (12)$$

em que: ER é o erro relativo; q_{mitSS} é a vazão média de longo termo específica da série sintética (SSo ou SSr), $m^3 s^{-1} km^{-2}$; q_{mitSO} é a vazão média de longo termo específica da série observada, $m^3 s^{-1} km^{-2}$.

3.4.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios por índices estatísticos

Na Tabela 1 são apresentadas as metodologias analisadas neste trabalho. Considerando as limitações associadas à aplicação da metodologia RCRreg e a importância da estimativa correta da CR, foram analisadas outras sete metodologias. Elas agregam diferentes níveis de complexidade na sua aplicação e, conseqüentemente, de precisão associada aos resultados obtidos. Acrescentou-se a estimativa da CR a partir dos dados observados de vazões diárias e sua associação com o T, sendo esta metodologia adotada como referência.

Tabela 1. Metodologias para obtenção da capacidade do reservatório

Sigla	Metodologia	Método	Vazões na seção de interesse
RReg	Regionalização da curva de regularização	Regionalização	não existe
RRes / RRes_T*	Regionalização da capacidade do reservatório	Regionalização	não existe
MSSr / MSSr_T*	Estimativa da CR baseada na metodologia de geração da SSr	MDA ou MDAM	Série sintética - SSr
MSSo / MSSo_T*	Estimativa da CR baseada na metodologia de geração da SSo	MDA ou MDAM	Série sintética - SSo
MSO_T*	Estimativa da CR baseada na SO	MDA ou MDAM	Série observada - SO

*A letra T após o nome das metodologias denota a associação da capacidade do reservatório ao período de retorno; MDA - máximo déficit acumulado; MDAM - máximo déficit acumulado modificado.

As metodologias de estimativa de CR foram avaliadas por dois índices estatísticos, o Índice de Nash-Sutcliffe modificado (E_1) e o índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD). Os valores de CR obtidos pela metodologia MSO_T foram considerados os “dados observados” e os valores obtidos pelas outras metodologias foram considerados os “dados estimados”.

A MSO_T estima a CR a partir da série histórica de dados fluviométricos, permite a consideração de uma demanda fixa ou variável no tempo e a associação da CR ao T. Sabe-se que mesmo a utilização de dados observados de vazões induz a erros, decorrentes, por exemplo, dos processos relativos à medição da vazão, da pequena representatividade das séries de dados, e do fato de medições realizadas no passado servirem de base para previsões futuras. Entretanto, essa é considerada a condição menos suscetível a erros relativos à base de dados e, portanto, seus valores foram considerados como referência no presente estudo.

3.4.4.1. Índice de Nash-Sutcliffe modificado (E_1)

Conforme já demonstrada a superioridade do E_1 em relação a outros índices de eficiência (r^2 e d_r), na revisão de literatura, este foi adotado. A equação para sua obtenção (Equação 6) também encontra-se na revisão de literatura.

3.4.4.2. Desenvolvimento de um índice de qualidade de dimensionamento de reservatórios (IQD)

Foi proposto neste estudo o Índice de Qualidade de Dimensionamento (IQD) que pode ser obtido pela equação

$$IQD = \frac{n}{\sum_{i=1}^n [ER_+ + (ER_- * FP)]} \quad (13)$$

em que: IQD é o índice de qualidade do dimensionamento, adimensional; n é o número de estações fluviométricas utilizadas; ER₊ é o erro relativo positivo de cada estação fluviométrica; ER₋ é o erro relativo negativo de cada estação fluviométrica; e, FP é o fator peso cujo valor adotado foi -1,5.

Especificamente para o caso de dimensionamento da capacidade de reservatórios, salvo as devidas proporções, subestimativas são mais prejudiciais que superestimativas, uma vez que, nestes casos, o projeto não cumpre seu objetivo de atender a demanda. Metodologias que subestimam a capacidade de um reservatório devem ser penalizadas, o que não ocorre quando se usa um índice que trabalha em módulo.

Ao se utilizar o IQD, diferentemente do que acontece em E₁, que trabalha em módulo, respeita-se a ocorrência de superestimativas e subestimativas, já que se procede a análise do ER entre a CR obtida pela MSO_T (referência), e a CR estimada pelas outras metodologias. O valor de IQD varia de entre 0 a +∞, sendo tanto maior seu valor quanto menor for o somatório do ER.

A CR estimada por cada metodologia, para cada estação fluviométrica pode ser maior ou menor que a CR calculada pela MSO_T. Se a CR for maior, o ER é positivo (ER₊), se for menor, o ER é negativo (ER₋), o que caracteriza subestimativa, então o ER₋ é penalizado pela multiplicação de um fator peso (FP), para o qual foi adotado o valor -1,5, cuja função é aumentar o erro em 50% e torná-lo positivo. Realizado isso, pode-se proceder ao somatório do ER de todas as estações fluviométricas consideradas, já que todos são positivos. A metodologia que apresentar menor somatório do ER, já devidamente multiplicado pelo FP, apresenta o maior IQD.

3.5. Estudo de caso

A sub-bacia do rio Paracatu, situada no Médio São Francisco, com área de drenagem de 45.600 km², é a segunda maior sub-bacia do São Francisco (BRASIL, 1996). Na Figura 4 está representada sua localização, divisão em RHHs e as estações fluviométricas utilizadas. A identificação das RHHs foi realizada por GPRH e IGAM (2012).

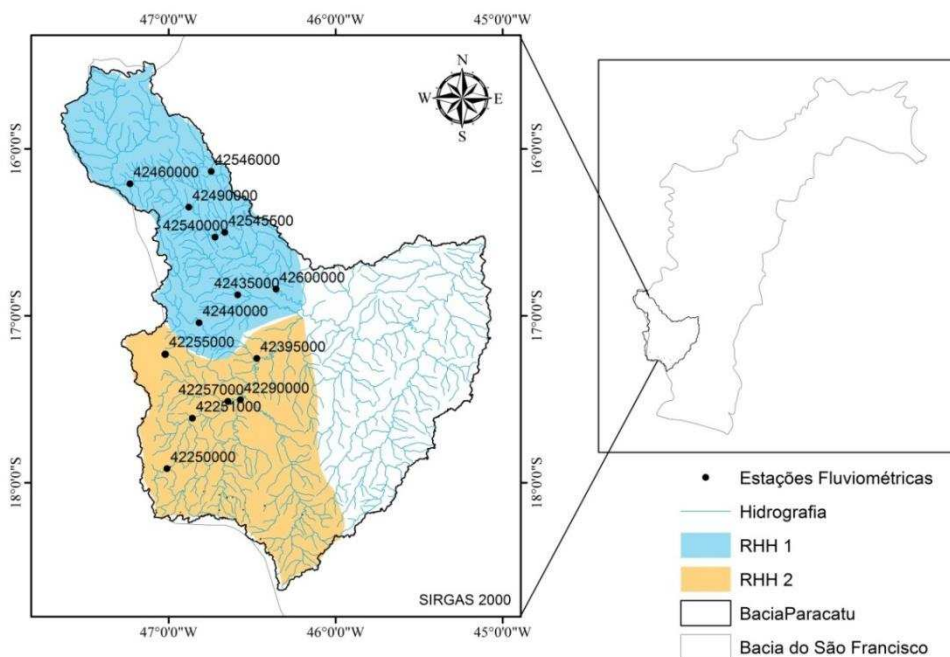


Figura 4. Localização da sub-bacia do Paracatu e das estações fluviométricas nela inseridas e, sua divisão em regiões hidrologicamente homogêneas.

3.5.1. Dados fluviométricos

Foram utilizadas as séries de dados históricos consistidos das estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas na RHH1 e 2. Os valores de Peq_{750} e Q_{mit} regionalizados foram obtidos de GPRH e IGAM (2012). O período base adotado foi de 1968 a 2005, ao qual foi feita uma análise da disponibilidade de dados. Anos com falhas superiores a 5% foram descartados. O diagrama de barras de dados de vazão para as estações fluviométricas utilizadas no estudo encontra-se no Apêndice.

Tabela 2. Estações fluviométricas utilizadas

RHH	Código	Longitude	Latitude	Área (km ²)	Peq ₇₅₀ (m ³ s ⁻¹)	Q _{mlt} obs. (m ³ s ⁻¹)	Q _{mlt} reg. (m ³ s ⁻¹)
RHH1	42435000	46°35'12"	16°52'28"	1590	21,00	17,46	19,03
	42440000	46°49'04"	17°02'31"	552	8,43	8,93	7,84
	42460000	47°13'58"	16°12'35"	3890	62,70	60,94	55,07
	42490000	46°52'48"	16°20'58"	5360	84,36	72,48	73,47
	42540000	46°43'16"	16°31'47"	5910	90,74	81,11	78,86
	42545500	46°39'46"	16°30'10"	679	9,35	8,37	8,67
	42546000	46°44'52"	16°08'06"	552	8,41	7,30	7,82
	42600000	46°21'26"	16°50'23"	9400	135,05	109,70	116,05
RHH2	42250000	47° 00' 38"	17° 54' 56"	464	10,42	7,76	7,95
	42251000	46° 51' 31"	17° 36' 48"	1870	42,08	28,55	29,38
	42255000	47° 01' 20"	17° 13' 48"	257	4,07	3,15	3,30
	42257000	46° 38' 46"	17° 30' 45"	2000	35,54	27,10	25,08
	42290000	46° 28' 26"	17° 15' 19"	7760	157,65	98,11	101,11
	42395000	46° 35' 12"	16° 52' 28"	12800	257,33	163,29	159,93

3.5.2. Demanda fixa

Na análise correspondente à demanda fixa foi utilizada uma equação de regularização do tipo

$$\beta = \frac{Q_r}{\bar{Q}} \quad (14)$$

em que: β é a fração da vazão média a ser regularizada, adimensional; Q_r é a vazão regularizada, m³ s⁻¹; e, \bar{Q} é a vazão média, m³ s⁻¹.

Foram utilizados os valores de β de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00.

3.5.3. Demanda variável

A Q_{mlt} representa a máxima vazão teoricamente regularizável, porém existem perdas por evaporação e infiltração. Neste sentido, para regiões úmidas, recomenda-se que a disponibilidade máxima considerada para regularização seja de 60 a 80% (Albuquerque; Rêgo, 1998; Tucci, 2012). O aspecto econômico também deve ser considerado. Especialmente para irrigação, dificilmente se regulariza mais de 60% da Q_{mlt} porque acima dessa

porcentagem a CR aumenta quase que exponencialmente, o que acarretaria em grande aumento do custo de construção.

Portanto, considerou-se que o valor máximo de Q_{mlt} a ser regularizado seria de 50%, e, 30% o mínimo, haja vista que para valores menores, os volumes a serem regularizados são baixos, e, muitas vezes, não é necessário construir reservatórios.

Outro fator a ser considerado, de acordo com a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março de 2012, é a manutenção do fluxo residual mínimo a jusante quando o curso de água for regularizado, sendo que, no Estado de Minas Gerais este valor deve ser superior a 50% da $Q_{7,10}$. Assim, para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial, além de considerar percentuais da Q_{mlt} , considerou-se também a abstração de 50% da $Q_{7,10}$. O volume máximo disponível anualmente se dá por

$$V_{\text{max. disp}} = (x Q_{mlt} - 50\% Q_{7,10})f \quad (15)$$

sendo, $V_{\text{max. disp}}$ o volume máximo disponível anualmente (hm^3); X o percentual da Q_{mlt} ; e, f é o fator de conversão (31,536)

Desse volume máximo disponível de água é que foi abstraído o requerimento da irrigação (RI). Foram testados três cenários de demanda variável, os quais encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Cenários de demanda variável no tempo compatíveis com o uso da água para irrigação

Cenário1(C1)	$(50\% Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - RI$
Cenário2(C2)	$(40\% Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - RI$
Cenário3 (C3)	$(30\% Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - RI$

Considerou-se a rotação entre o milho safrinha e o feijão das águas, sendo a data de semeadura de 01 de fevereiro e 01 de outubro, respectivamente, segundo a Associação de Apoio aos Produtores de Entre RIBEIROS (AAPER), localizada na sub-bacia do Paracatu. A demanda de irrigação para essas culturas foi estimada por Ramos (2016) considerando o balanço hídrico entre evapotranspiração de referência e precipitação provável com 80% de probabilidade.

Tabela 4. Vazão unitária necessária ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) para irrigação de milho e feijão na da bacia do Paracatu.

Demanda diária de irrigação para cada mês ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$)							
Milho					Feijão		
FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	OUT	NOV	DEZ
-	0,016	0,059	0,044	0,028	0,030	0,005	-

Fonte: Ramos (2016)

A relação entre volume máximo disponível (base anual) e volume demandado pela irrigação para o feijão e milho (base anual) proporciona a área potencialmente irrigável em cada área de drenagem das estações fluviométricas. Este valor serve como entrada para calcular a demanda de irrigação definida em valores unitários por área ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$), como pode ser visto na Tabela 4.

Assim, em cada série de vazões, as demandas de irrigação, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, e em base diária, foram consideradas para o cálculo da CR.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Séries sintéticas de vazões geradas e sua análise

Na Figura 5 são apresentados os valores de q_{mit} para cada estação fluviométrica, calculados a partir da série observada SO e das séries sintéticas obtidas pela q_{mit} observada e regionalizada (SSo e SSr), e os valores do erro relativo (ER), em termos percentuais.

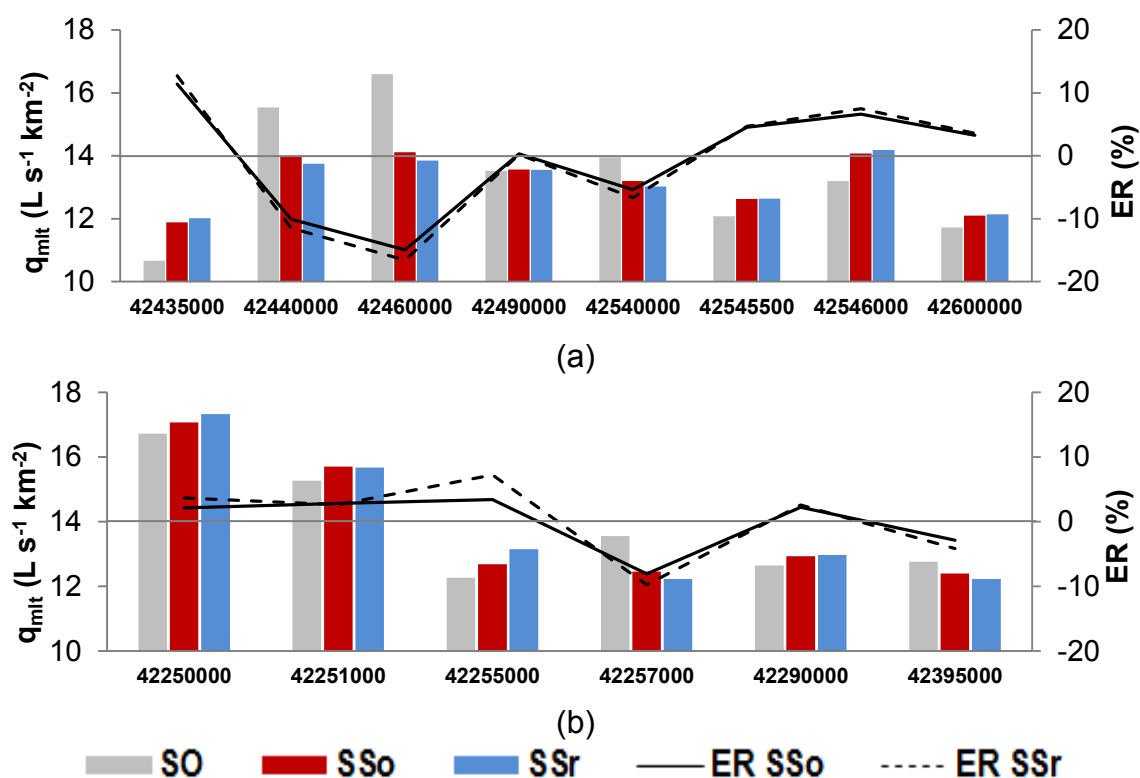


Figura 5. Vazão média de longo termo específica da SO, SSo e SSr e, ER percentual das séries sintéticas em cada estação fluviométrica na RHH1 (a) e RHH2 (b).

Na RHH1 o valor de ER percentual variou de aproximadamente -15 a 11% para SSo e de -17 a 13% para SSr (Figura 5a). Já na RHH2 a variação foi

de -8 a 3% e de -10 a 7% para SSo e SSr, respectivamente (Figura 5b). Não houve tendenciosidade do método, visto que as estimativas de q_{mit} não foram sistematicamente subestimadas ou superestimadas. Percebe-se que a amplitude de variação do ER percentual foi maior para a SSr, em ambas as RHHs. De forma geral, as séries sintéticas representaram bem a magnitude da q_{mit} para as estações consideradas, dado que o valor médio de ER percentual em módulo, não passou de 8% na RHH1 e de 5% na RHH2.

Os maiores valores de ER percentual foram observados na estação 42460000 na RHH1, e na estação 42257000, na RHH2. Tal condição decorre do fato dessas estações apresentarem os maiores valores de ER percentuais (-14,7% e -7,4%, respectivamente) no processo de regionalização de vazões realizado por GPRH e IGAM (2012), o que indica a influência da qualidade da regionalização na representatividade das séries sintéticas (Figura 6).

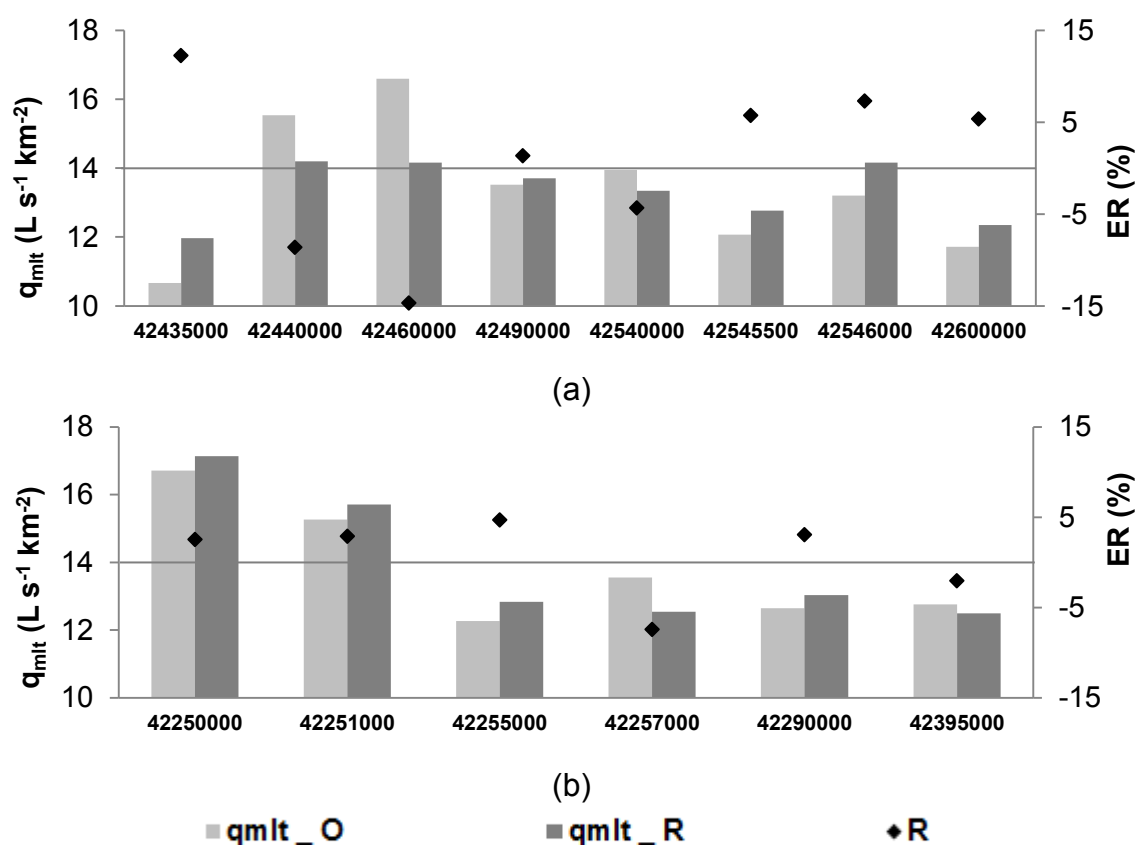


Figura 6. Vazão média de longo termo observada (q_{mit_O}), regionalizada (q_{mit_R}) e ER percentual na RHH1 (a) e RHH2 (b). Fonte: GPRH e IGAM (2012), adaptado.

Quanto à análise das duas condições de geração das séries sintéticas (SSo e SSr), verifica-se, para ambas as RHHs, que o menor ER percentual médio é obtido na SSo, cujos valores foram 11 e 28% menores que na SSr,

para RHH1 e RHH2, respectivamente. Tais resultados sugerem que séries sintéticas melhores são obtidas quando se utiliza, para as estações fluviométricas envolvidas, dados observados de vazão média ao invés de dados regionalizados. Mesmo na SSo ainda é utilizado um valor regionalizado, que é a q_{mit} da seção de interesse onde se deseja construir o reservatório. Na SSr, além da q_{mit} da seção de interesse, são utilizados valores regionalizados para as q_{mit} das estações fluviométricas.

Para verificar a representatividade das vazões médias mensais pelas séries sintéticas geradas, são apresentados nas Figuras 7 e 8, os valores de vazão e desvio padrão (s) mensais para as estações 42490000 (RHH1) e 42395000 (RHH2), por serem representativas do comportamento das demais.

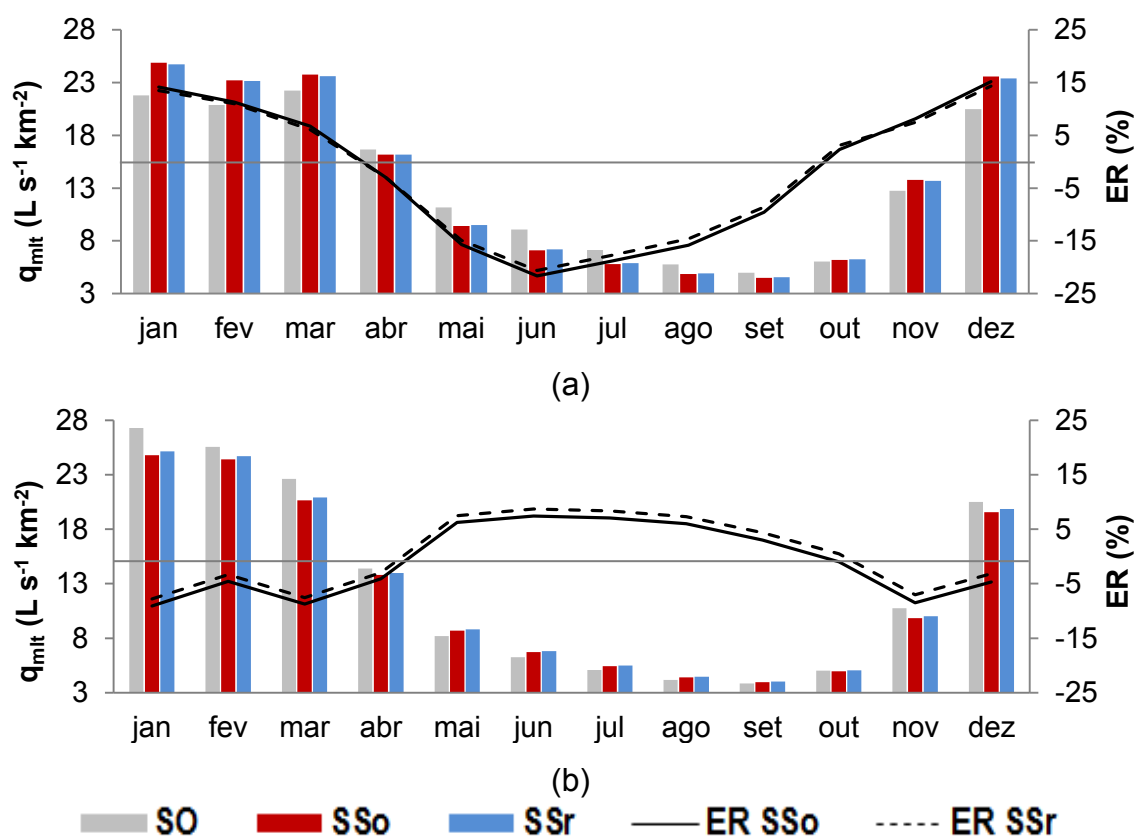


Figura 7. Vazão média mensal de longo termo da SO, SSo e SSr, e ER percentual da SSo e SSr para as estações fluviométricas 42490000 (a) e 42395000 (b).

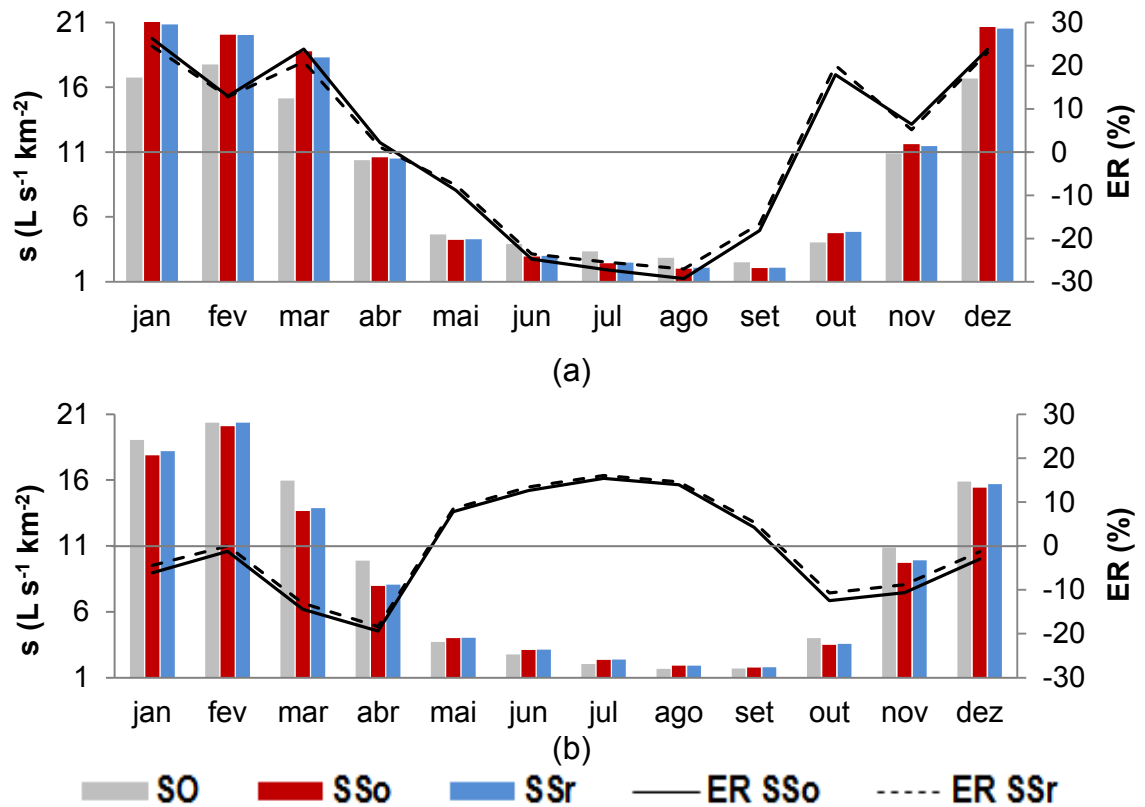


Figura 8. Desvio padrão da vazão média mensal de longo termo da SO, SSo e SSr, e ER percentual da SSo e SSr para as estações fluviométricas 42490000 (a) e 42395000 (b).

Analisando a Figura 7 é possível observar que as séries sintéticas conseguem representar bem a sazonalidade das vazões, pois, assim como na série original, apresentam os maiores valores de vazão de novembro a março, em resposta ao período chuvoso da região, e os menores valores de abril a outubro, em decorrência do período de estiagem (Figura 9). As estimativas da magnitude das vazões foram satisfatórias, com o ER variando de -22 a 15% (42490000) e de -9 a 7% (42395000) para SSo, enquanto que para SSr a variação foi de -21 a 14% (42490000) e de -8 a 9% (42395000).

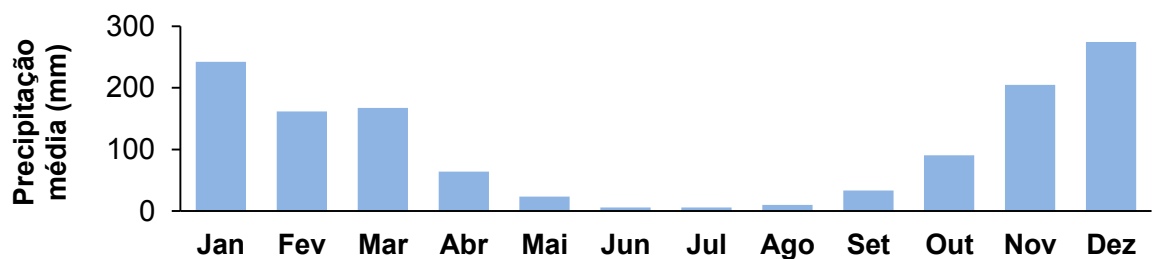


Figura 9. Precipitação média mensal na bacia do Paracatu.

As séries sintéticas subestimaram a q_{mit} de abril a setembro e superestimaram de outubro a março na estação 42490000 (Figura 7a). Este comportamento foi evidenciado em 43% das estações. Comportamento diferente ocorreu na 4239500 (Figura 7b), e se repete em 38% das outras estações, pois as séries sintéticas subestimam as vazões médias mensais de outubro a abril e superestimam de maio a setembro. O restante das estações (19%) subestimou ou superestimou as vazões médias mensais para todos os meses, exibindo ER percentuais muito baixos. Tal fato caracteriza que não há uma tendenciosidade na representação das vazões.

Na Figura 8 é apresentado o comportamento do desvio padrão (s) das vazões médias mensais e o ER percentual correspondente ao desvio padrão. De maneira geral, o desvio padrão é maior no período chuvoso por causa da maior dispersão dos valores de vazão decorrentes do escoamento superficial direto causado por eventos de precipitação. Por outro lado, no período de estiagem o desvio padrão é baixo, já que a influência da precipitação nas vazões é muito pequena. Isso ocorre porque o solo está com um alto déficit de umidade e, quando da ocorrência das primeiras precipitações, estas ficam retidas na zona não saturada, não atingindo, conseqüentemente, o lençol freático. Como pode ser verificado na Figura 8, as séries sintéticas representaram bem a dispersão dos dados de vazão, com os maiores valores no período chuvoso e menores no período de estiagem.

Analisando o desvio padrão da série original e das séries sintéticas é possível notar que, em termos absolutos, as maiores diferenças ocorrem no período chuvoso, ao passo que, em relação ao ER percentual, as maiores diferenças ocorrem no período de estiagem. Como no período de estiagem a dispersão dos dados é baixa, mesmo uma pequena diferença absoluta entre o desvio padrão da série original e da série sintética pode acarretar em elevados valores de ER percentual, o que explica os maiores valores de maio a setembro, sejam eles negativos (Figura 8a) ou positivos (Figura 8b).

Ainda assim, as séries sintéticas conseguiram representar bem a dispersão da série original, dado que o ER percentual associado ao desvio padrão variou de -29 a 26% (42490000) e de -19 a 15% (42395000) para SSo, e de -27 a 24% (42490000) e de -18 a 16% (42395000) para SSr.

Para os valores mensais, tanto de vazões como do desvio padrão destas, as séries SSo e SSr apresentaram comportamento muito semelhante, não sendo possível identificar a superioridade de uma delas.

4.2. Dimensionamento da capacidade do reservatório utilizando as séries sintéticas e sua comparação com outras metodologias

4.2.1. Dimensionamento da capacidade do reservatório por diferentes metodologias considerando demanda fixa

4.2.1.1. Análise preliminar dos dados

A análise dos resultados mostrou que a seleção da FDP em função da menor amplitude do intervalo de confiança indicava diferentes FDPs à medida que se variava o T, e que estas exibiam diferentes valores de CR e, às vezes, inconsistentes. Neste sentido, avaliou-se a frequência de ocorrência de cada FDP para definir qual seria utilizada (Tabela 5).

Tabela 5. Frequência de ocorrência das FDPs na RHH1 e RHH2 em cada regra de operação considerando demanda fixa

	Frequência de ocorrência (%)			
	Regra de operação anual		Regra de operação plurianual	
	Gumbel	Log Normal 3	Pearson 3	Log Normal 2
RHH1	46	54	25	75
RHH2	47	53	10	90

Como pode ser visto na Tabela 5, nas duas RHHs a FDP com maior frequência de ocorrência para regra de operação anual foi a Log Normal 3. Assim, essa distribuição foi adotada sem prejuízo para os resultados, uma vez que a maior variação observada entre a CR estimada por Gumbel e por Log Normal 3 foi de 25%, e a variação média foi de 10%. Para regra de operação plurianual foi adotada a Log Normal 2, por ser a mais frequente, também sem prejuízo para os resultados, pois a maior variação observada entre a CR estimada por Pearson 3 e por Log Normal 2 foi de 10%, e a variação média foi de, aproximadamente, 5%. Uma vez definidas as FDPs, foram obtidos os novos valores de CR associadas ao T desejado para as metodologias MSSr_T, MSSo_T, MSO_T e RCRes_T.

4.2.1.2. Capacidades de reservatório geradas pelas diferentes metodologias: exemplo numérico para uma seção da hidrografia

Na Figura 10 são apresentados os valores de CRs estimados pelas metodologias MSSr, MSSo, MSSr_T, MSSo_T, RCRReg, RCRRes, RCRRes_T e MSO_T. Utilizou-se, como exemplo, a estação fluviométrica 42395000, dada sua representatividade em relação ao comportamento das demais.

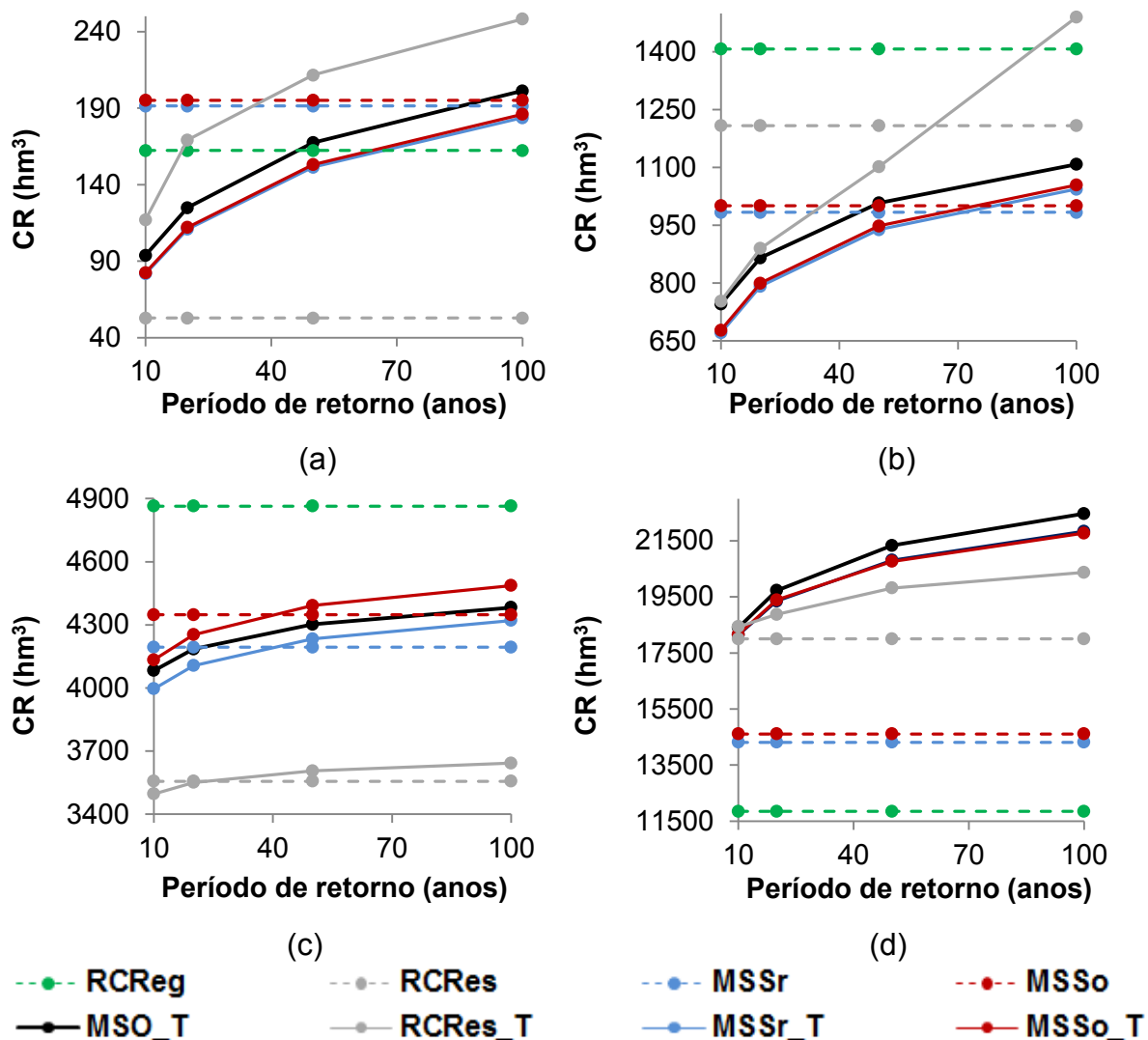


Figura 10. Capacidades do reservatório por período de retorno considerando β de: 0,25 (a), 0,50 (b), 0,75 (c) e 1,00 (d) para a estação fluviométrica 42395000 considerando demanda fixa.

As metodologias RCRRes, MSSr e MSSo possibilitam a consideração de uma demanda fixa ou variável no tempo, mas não fazem a associação da CR a um T. Tais metodologias foram utilizadas por serem de mais fácil aplicação que

aquelas que associam a CR a um T. Dentre as três, a MSSr e a MSSo (se houver um estudo prévio de regionalização de vazões) são de mais fácil aplicação que a RCRes, pois, uma vez geradas as séries sintéticas, basta aplicar o método MDA para se obter a CR. Na RCRes, além de se ter de aplicar o método MDA para cada estação fluviométrica para obtenção da CR, ainda se tem que proceder a regionalização das CRs para geração da equação de estimativa da CR na seção de interesse.

Analisando a Figura 10 percebe-se, nas metodologias RCRes, MSSr e MSSo, representadas pelas linhas tracejadas, a repetição do valor da CR mesmo com a variação do T, o que é esperado pelo fato destas não associarem a CR ao T, assim como ocorre na RCReg. Para estas metodologias foi observada a ocorrência tanto de grandes subestimativas como de grandes superestimativas da CR.

Ao analisar o comportamento das metodologias que não consideram o T na determinação da CR, a RCReg se mostra como a menos adequada, pois apresenta os comportamentos mais discrepantes da MSO_T em três valores de β (0,50; 0,75; e 1,00). Neste sentido, a adoção das outras metodologias já configura um ganho em representatividade da CR. Dentre as três, a MSSr e a MSSo sobressaem, dada a maior proximidade dos valores de CR aos estimados pela MSO_T em relação à RCRes. As metodologias MSSr e MSSo se mostram superiores à RCRes em três dos quatro valores de β , sendo piores somente para $\beta=1,00$ (Figura 10d).

Com base nessas análises se constatou que, dentre as metodologias que não consideram o T, a MSSr e a MSSo apresentaram melhor desempenho. Isso indica que a utilização da metodologia proposta de geração de séries sintéticas melhora a qualidade do dimensionamento de reservatórios.

Apesar das metodologias MSSr e MSSo apresentarem comportamento superior à RCReg e RCRes, é recomendada a utilização de metodologias que contemplem a associação da CR ao T. Mesmo que envolvam um caráter de complexidade maior, por conta da aplicação do método MDAM e das FDPs, não há um grande trabalho adicional que justifique sua não consideração. Conforme Naghettini e Pinto (2007), o dimensionamento de reservatórios para controle de estiagens com base em metodologias que consideram um fator de frequência é mais adequado, pois a magnitude de um evento de seca é relacionada a uma frequência de ocorrência.

Os reservatórios trazem muitos benefícios como: o fornecimento de água para o abastecimento público, a geração de energia hidrelétrica, a garantia da irrigação, o controle de inundações, entre outros. Apesar dos benefícios, são cada vez mais frequentes os questionamentos acerca da sustentabilidade dessas estruturas (WCD, 2000; Fearnside, 2005; Albuquerque Filho et al., 2010; Briscoe, 2011; Gomide, 2012). Principalmente nos últimos 30 anos, seus benefícios começaram a ser contestados frente aos potenciais impactos negativos que tais estruturas podem causar (WCD, 2000; Briscoe, 2011; Gomide, 2012).

Independente se a capacidade do reservatório estiver aliada a uma menor ou maior segurança hídrica, essa estrutura apresenta vantagens e desvantagens no que diz respeito ao seu dimensionamento.

O barramento e instalação de um reservatório em um curso d'água, por menor que seja, altera o equilíbrio estabelecido no ciclo hidrológico, induzindo a rearranjos na busca de um novo equilíbrio. Isto inclui alteração nos processos de transporte e deposição de sedimentos no rio, modificações na salinidade da água e interferência na dinâmica de organismos aquáticos (Vorosmarty et al., 1997; Biemans et al., 2006; Goodwin et al., 2006), e alterações no efeito estufa ocasionado pela perda da vegetação nas áreas alagadas, que não sequestrará carbono (Rosa et al., 1996a; Fearnside, 2005; Stevaux et al., 2009), além da alteração do albedo dessas áreas.

O aumento da segurança hídrica, proporcionado por reservatórios maiores, potencializa os impactos mencionados, uma vez que quanto maior a área alagada, maior seu impacto ambiental. No que se refere aos impactos econômicos, a maior segurança hídrica acarreta em um aumento do custo da obra, cuja estimativa é complexa, pois envolve além do custo de construção, o custo de reassentamento da população, quando necessário (Araújo et al. 2004; Loucks; Beek, 2005).

Há que se considerar também os impactos sociais decorrentes da realocação de pessoas, cujo custo não é mensurável. Albuquerque Filho et al. (2010) ressaltam que, em muitos casos, depois de construído um reservatório, há um expressivo aumento do desemprego dos trabalhadores temporários atraídos pela construção, provocando uma migração para fora da região de influência da obra. Também podem ocorrer prejuízos do ponto de vista cultural se na área a ser inundada houver patrimônio histórico e arqueológico.

Por outro lado, quando os reservatórios dimensionados pecam no quesito segurança hídrica, por estarem subdimensionados em relação à demanda, os impactos ambientais, econômicos e sociais citados são bem menores. Entretanto, uma menor segurança hídrica pode causar outros impactos, como não atender o abastecimento público de água, causar o racionamento de energia, e o custo de não proporcionar à indústria a quantidade de água necessária para manter a produção (Biemans et al., 2006; Briscoe, 2011; Gomide, 2012). Esses impactos são ainda de maior relevância em locais onde a construção de reservatórios é de extrema necessidade, como em regiões do semi-árido brasileiro (Hauschild; Döll, 2000; WCD, 2000).

Nesse sentido, a construção de reservatórios deve buscar um balanço favorável entre os impactos positivos e negativos envolvidos. Deve-se sempre preconizar a utilização de metodologias mais assertivas o quanto possível para o dimensionamento de reservatórios, tendo em vista que o aumento da segurança hídrica potencializa os impactos ambientais, econômicos e sociais mencionados, e, a diminuição dessa segurança, que por um lado reduz alguns desses impactos, leva a outros.

Assim, associar a CR a um fator de frequência (T) pode possibilitar o aumento da segurança hídrica com menores impactos. Além disso, a adoção do T promove um arranjo de possibilidades de diferentes riscos/confiabilidade para o dimensionamento do reservatório (Pegram et al., 1980; ASCE, 1996; Koutsoyiannis, 2005c).

Os valores de CR estimados pela RCRes_T, MSSr_T e MSSo_T, como esperado, variaram à medida que o T foi alterado (Figura 10), apresentando assim um comportamento diferente do exibido pelas metodologias RCRReg, RCRes, MSSr e MSSo.

Dentre as metodologias que consideram o T (RCRes_T, MSSr_T e MSSo_T), a RCRes_T foi a que apresentou o pior desempenho. A RCRes_T apresentou os comportamentos mais discrepantes em relação à MSO_T para os quatro β s. Apesar de não ter apresentado tendência de subestimativa ou superestimativa, quando a metodologia RCRes_T apresentou subestimativas da CR (Figuras 10c e 10d), estas foram maiores que as exibidas pelas metodologias MSSr_T e MSSo_T, principalmente para $\beta=0,75$. Este comportamento revela uma menor segurança hídrica proporcionada por esta metodologia.

As metodologias MSSr_T e MSSo_T, por outro lado, acompanharam o comportamento da MSO_T para todos os valores de β , não exibindo discrepâncias como as que ocorreram na RCRes_T. Essas metodologias, no entanto, apresentam uma menor segurança hídrica, representada pela tendência de subestimativa da CR para a estação fluviométrica em análise. A única exceção foi para $\beta=0,75$ e somente para a MSSo_T, a qual superestimou a CR em todos os T (Figura 10c). Apesar da menor segurança hídrica não ser benéfica, principalmente considerando usos nobres da água, onde a demanda deve ser atendida com uma maior frequência, as subestimativas da CR apresentadas pelas metodologias MSSr_T e MSSo_T foram baixas, o que pode ser comprovado pela proximidade das linhas que as representam em relação à linha da MSO_T (Figura 10). Tal constatação configura as metodologias MSSr_T e MSSo_T como as mais adequadas ao dimensionamento de reservatórios para locais sem disponibilidade de dados.

Diante da superioridade das metodologias MSSr_T e MSSo_T em relação às outras, conclui-se que, para a estação 42395000, a metodologia proposta de estimativa de séries sintéticas de vazões diárias quando utilizada para estimar a CR e, quando esta é associada a um T, agregou em qualidade no dimensionamento de reservatórios.

4.2.1.3. Análise conjunta das capacidades de reservatórios geradas para as 14 seções da hidrografia

Considerando a análise da estimativa da CR, na Figura 11 são apresentados, para cada uma das 14 estações fluviométricas, as médias dos valores de ER resultantes de 16 combinações – quatro valores de β e quatro de T – (colunas); o desvio padrão (barras); os valores máximos de ER (pontos); e, os valores médios de ER por RHH (linhas contínuas) por metodologia. Na Figura 11a são apresentadas as metodologias que não consideram o T, e na Figura 11b as que o consideram.

Reiterando os resultados da estação 42395000, ao se comparar as Figuras 11a e 11b, é nítida a superioridade das metodologias que associam a CR ao T. Tais metodologias exibiram, quanto à CR, menores valores de: superestimativas, subestimativas, desvio padrão, amplitude do ER e ER médio

por RHH. Nesse sentido, a adoção das metodologias RCRes_T, MSSr_T ou MSSo_T conduz a um dimensionamento mais racional dos reservatórios.

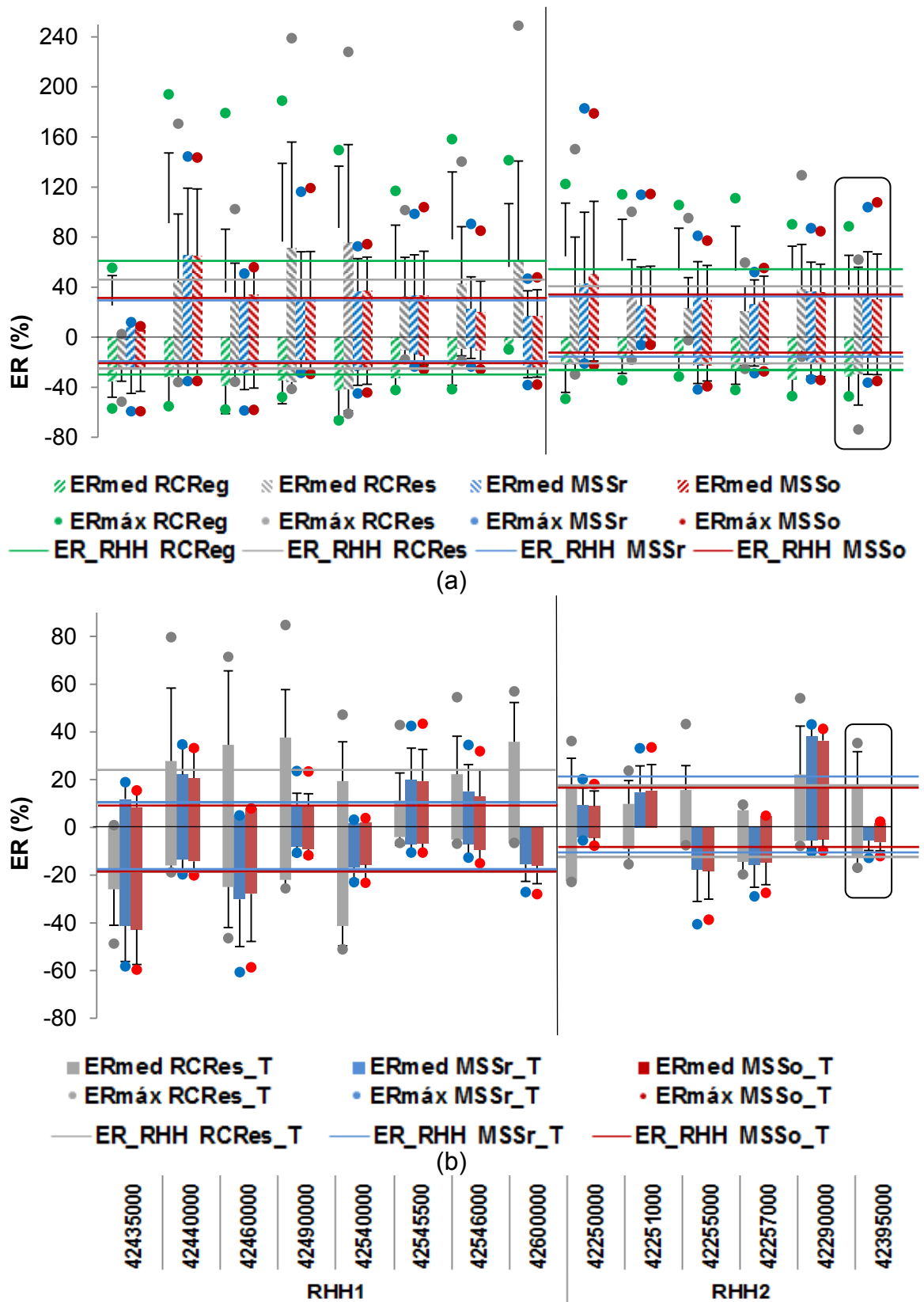


Figura 11. ER percentual médio e máximo para cada estação fluviométrica, e, ER percentual médio por RHH para as metodologias que: não consideram o T (a); o consideram (b), para demanda fixa e para cada RHH.

Analisando a Figura 11a percebe-se que as metodologias que não consideram o T tendem a apresentar maiores superestimativas do que subestimativas da CR. Esses resultados sugerem que a probabilidade de superdimensionamento dos reservatórios é maior com o uso dessas metodologias.

Dentre as metodologias que não consideram o T, a RCReg foi a que mais se distanciou dos valores de referência, apresentando sistematicamente grandes magnitudes de superestimativas e subestimativas da CR para as 14 estações. Em pelo menos 11 estações, a CR foi superestimada em mais de 100% ou subestimada em mais de 40%. As linhas de ER médio por RHH nas posições mais extremas do gráfico, tanto na RHH1 como na RHH2, confirmam esta metodologia como a menos adequada em estimar a CR, o que já tinha sido evidenciado na estação 42395000.

As metodologias RCRes, MSSr e MSSo, nessa análise conjunta, também se mostraram superiores à RCReg. Todavia, chama a atenção o fato da RCRes ter exibido valores máximos de superestimativas superiores a 200% em três estações. Tanto na RHH1 como na RHH2 a metodologia RCRes se mostra como a segunda menos adequada. Ela também apresentou grandes superestimativas e subestimativas da CR, bem como desvios bem acentuados.

Já as metodologias MSSr e MSSo, por sua vez, são superiores à RCRes, uma vez que exibem menores valores médios de superestimativas, subestimativas, desvios e amplitudes do ER, tanto na RHH1 como na RHH2. Os valores estatísticos analisados das duas metodologias foram muito similares, o que resultou em valores médios muito próximos. Confirmando o resultado obtido na análise da estação 42395000, a adoção da metodologia de geração de séries sintéticas agrega melhorias na qualidade da estimativa da CR.

As metodologias MSSr e MSSo, todavia, exibiram grandes superestimativas da CR, o que aumenta a segurança hídrica, mas causa impactos negativos na área econômica, ambiental e social, que podem sobrepor os benefícios advindos da construção dos reservatórios. Nesse sentido, mesmo diante da maior facilidade de aplicação de tais metodologias, não se justifica utilizá-las quando existem as que associam a CR ao T, pois estas trazem melhores resultados.

Na Figura 11b, observa-se que nas metodologias que associam a CR ao T (RCRes_T, MSSr_T, MSSo_T) não há uma predominância de superestimativas, o que ocorre é um equilíbrio. O comportamento das metodologias apresentou algumas divergências entre si, em relação à RHH1 e RHH2, e em relação ao comportamento evidenciado na estação 42395000.

A RCRes_T, considerando as duas RHHs, exibiu um valor médio de superestimativas que não passou de 25%, e de subestimativas, 18%. Diante da complexa tarefa de representação dos processos hidrológicos, esses resultados podem ser considerados satisfatórios. Entretanto, na RHH1, foi a metodologia com maior média de superestimativa da CR, exibindo grandes desvios e valores máximos de ER, nitidamente identificáveis na Figura 11b. Na RHH2, no entanto, a MSSr_T foi a metodologia que apresentou a maior média de superestimativas, o que não aconteceu na estação 42395000. Quanto às subestimativas da CR, tanto na RHH1 como na RHH2, esta metodologia apresentou as maiores médias.

As metodologias MSSr_T e MSSo_T, por sua vez, apresentaram médias de ER, desvio e amplitude do ER inferiores aos obtidos pela RCRes_T, conferindo-lhes assim vantagem preditiva da CR. O comportamento estatístico das duas novamente é muito similar, principalmente na RHH1. Na RHH2, no entanto, o comportamento da MSSo_T foi melhor que o apresentado pela MSSr_T, uma vez que seus valores de ER médio, tanto de subestimativas como superestimativas foram menores.

A conclusão a que se chegou analisando somente a estação 42395000 é confirmada nesta análise conjunta das oito estações fluviométricas da RHH1 e seis da RHH2: a metodologia proposta de estimativa de séries sintéticas de vazões diárias, quando utilizada para estimar a CR, e quando esta é associada a um T, agregou em qualidade no dimensionamento da CR (MSSr_T e MSSo_T).

Nesta análise conjunta, no entanto, conseguiu-se fazer a distinção de qual a melhor metodologia dentre a MSSr_T e MSSo_T, sendo a MSSo_T indicada como a mais adequada. Essa constatação sugere que séries sintéticas melhores são obtidas quando se utiliza, para as estações fluviométricas envolvidas, dados observados de q_{mlt} ao invés de dados regionalizados. Tal constatação também aconteceu quando se analisou a representatividade da q_{mlt} pelas séries sintéticas.

Em síntese, as diferentes combinações de demanda e T para as 14 estações fluviométricas demonstraram um maior risco de ineficiência no dimensionamento de reservatórios quando as seguintes metodologias foram utilizadas: RCRReg, RCRRes, MSSo, MSSr e RCRRes_T. A MSSr_T e a MSSo_T se destacaram como as melhores metodologias utilizadas para estimar a CR considerando a demanda fixa, sendo a MSSo_T ligeiramente superior.

4.2.1.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios

Como em análise preliminar as metodologias que não fazem a associação da CR ao T não se mostraram adequadas, elas foram excluídas. Apesar da RCRReg também não fazer essa associação, foi mantida por ser a mais frequentemente utilizada na estimativa da CR em locais sem monitoramento fluviométrico.

Na Figura 12 são apresentados os valores médios de E_1 por β em cada RHH, os quais foram obtidos pela média dos valores de E_1 nos Ts considerados (T=10; T=20; T=50; e T=100).

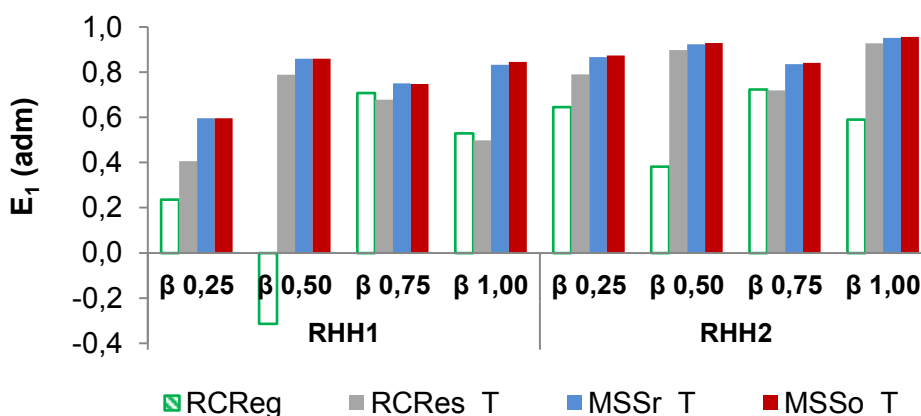


Figura 12. E_1 médio para cada valor de β nas regiões RHH1 e RHH2 considerando demanda fixa.

Como o E_1 varia de $-\infty$ a 1, e quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste entre os dados de referência e os estimados (Krause et al., 2005), em geral a RCRReg apresentou os menores valores de E_1 , tanto na RHH1 quanto na RHH2 (Figura 12). Na RHH1, um valor de E_1 chegou a ser negativo, o que, segundo a interpretação do índice, indica sua exclusão.

As metodologias MSSr_T e MSSo_T se destacaram em relação à RCRRes_T, pois apresentaram, para todos os β s analisados, os maiores valores

de E_1 . Na RHH1, notou-se que, à medida que se diminui o valor de β , a capacidade preditiva piora. Uma análise mais aprofundada, na qual se fez um ranqueamento das metodologias quanto ao seu desempenho, pode ser visualizada na Tabela 6.

Tabela 6. Metodologias que apresentaram melhores desempenhos para estimar a CR para cada β e T por RHH, considerando o índice E_1 e, a variação percentual entre o valor de E_1 da melhor metodologia e da MSSo_T para demanda fixa

	β	T	Melhor	2ª Melhor	Δ % Melhor e MSSo_T
RHH1	0,25	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo	MSSr	-8
		50	MSSo	MSSr	-9
		100	RCTeg	MSSo_T	-19
	0,5	10	MSSr_T	MSSo_T	-1
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,75	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSr_T	MSSo_T	-1
	1	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
RHH2	0,25	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,5	10	RCTes_T	MSSo_T	-8
		20	RCTes_T	MSSo_T	-4
		50	MSSo	MSSr	-3
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,75	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo	MSSr	-2
		100	MSSo	MSSr	-3
	1	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0

Pela análise da Tabela 6 pode-se concluir que, em termos gerais, a metodologia MSSo_T apresentou melhor desempenho em, aproximadamente, 69% dos casos, e quando não foi a melhor, apresentou o segundo melhor desempenho em 16% dos casos. Mesmo quando a metodologia MSSo_T não se configura como a segunda com melhor desempenho (15% dos casos), ainda assim ela pode ser substituída pela que apresentou maior valor de E_1 sem prejuízo dos resultados se a diferença percentual for baixa. Considerando

distorções menores que 30%, a metodologia MSSo_T pode ser indicada em todos os casos.

Na Figura 13 são apresentados os valores médios de IQD por β em cada RHH, os quais foram obtidos pela média dos valores de IQD nos Ts considerados ($T=10$; $T=20$; $T=50$; e $T=100$).

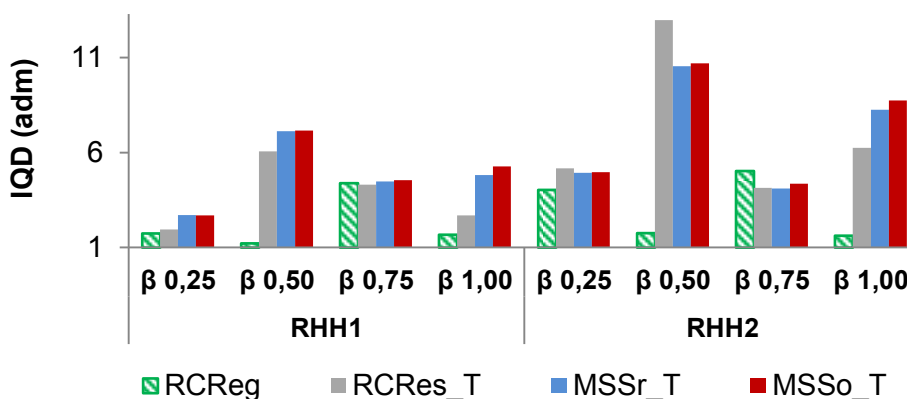


Figura 13. IQD médio para cada valor de β na RHH1 e RHH2 considerando demanda fixa.

O IQD varia de 0 a $+\infty$, sendo tanto maior seu valor quanto menor for o ER entre a CR estimada pela metodologia em análise e a calculada pela metodologia de referência (MSSo_T). O valor de IQD é uma medida de comparação entre as metodologias, sendo que, quanto maior seu valor, melhor é a metodologia em estimar a CR.

Comparativamente ao E_1 , o índice IQD preza mais pela segurança hídrica, uma vez que o ER das subestimativas são majorados pelo fator peso da equação de IQD (Equação 13). Assim, metodologias que apresentam subestimativas são penalizadas pelo IQD, sendo-lhes atribuídos valores menores deste índice.

Confirmando o que foi observado com o índice E_1 , o pior desempenho foi apresentado pela RCRég, que, com exceção do $\beta=0,75$, apresentou os menores valores de IQD. Ainda que para este β a RCRég tenha se mostrado semelhante às demais metodologias, os menores valores de IQD apresentados para as outras demandas indicam que ela não se configura como uma boa alternativa para estimar a CR.

Em análise geral, as metodologias MSSr_T e MSSo_T foram as que apresentaram os maiores valores de IQD. Na RHH1, a MSSo_T apresentou os maiores valores de IQD para todos os β . Sua superioridade em relação à

MSSr_T ficou mais evidente do que quando se utilizou o E_1 , resultado da maior sensibilidade do índice às subestimativas da CR. Na RHH2, a MSSo_T apresentou os maiores valores médios de IQD para valores de $\beta=0,75$ (segundo maior valor) e 1,00, pois, para $\beta=0,25$ e 0,50, a RCRes_T exibiu os maiores valores. O melhor desempenho apresentado pela metodologia RCRes_T para $\beta=0,25$ e 0,50 deve-se à menor subestimativa da CR por ela exibida em comparação à metodologia MSSo_T. Para esses valores de β , a metodologia RCRes_T preza mais pela segurança hídrica que a MSSo_T. O ranqueamento das metodologias quanto ao seu desempenho pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7. Metodologias que apresentaram melhores desempenhos para cada β e T por RHH considerando o índice IQD e, a variação percentual entre o valor de IQD da melhor metodologia e da MSSo_T para demanda fixa

	β	T	Melhor	2ª Melhor	Δ % Melhor e MSSo_T
RHH1	0,25	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSr_T	MSSo_T	-1
		50	MSSr	MSSo	-9
		100	RCReg	MSSo_T	-14
	0,50	10	MSSr_T	MSSo_T	-5
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,75	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	RCRes	MSSo_T	-0,4
		100	RCRes	RCReg	-6
	1,00	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
RHH2	0,25	10	RCRes_T	MSSo_T	-31
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	RCReg	MSSo_T	-37
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,50	10	RCRes_T	MSSo_T	-53
		20	RCRes_T	MSSo_T	-57
		50	MSSo	MSSo_T	-30
		100	MSSo_T	MSSr_T	0
	0,75	10	RCReg	RCRes_T	-24
		20	RCReg	MSSo_T	-13
		50	RCReg	MSSo	-6
		100	MSSo	RCReg	-5
	1,00	10	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
		50	MSSo_T	MSSr_T	0
		100	MSSo_T	MSSr_T	0

Pela análise da Tabela 7 pode-se concluir que, em termos gerais, a metodologia MSSo_T apresentou melhor desempenho em, aproximadamente,

53% dos casos e, quando não foi a melhor, apresentou o segundo melhor desempenho em 31% dos casos. Apesar da MSSo_T ter apresentado o segundo melhor desempenho, em alguns casos ocorreram distorções acima de 30%, como em $\beta=0,50$ para $T=10$ e 20 . Ainda assim, dada a maior frequência em que esta metodologia se mostrou superior às outras quanto ao seu desempenho, ela pode ser utilizada para estimar a CR.

Em síntese, na Tabela 8 são apresentadas as metodologias que apresentaram melhor desempenho para estimar a CR em cada β e em cada RHH considerando os índices E_1 e IQD.

Tabela 8. Metodologias que apresentaram melhor desempenho para estimar a CR em cada β e cada RHH considerando os índices E_1 e IQD para demanda fixa

	β	E_1	IQD
RHH1	0,25	MSSo_T	MSSo_T
	0,50	MSSo_T	MSSo_T
	0,75	MSSo_T	MSSo_T
	1,00	MSSo_T	MSSo_T
RHH2	0,25	MSSo_T	RRes_T
	0,50	MSSo_T	RRes_T
	0,75	MSSo_T	MSSo_T
	1,00	MSSo_T	MSSo_T

É possível notar que a MSSo_T se destacou das demais metodologias em termos de desempenho na estimativa da CR, mas nem todos os resultados obtidos com E_1 são ratificados pelo IQD. Na RHH2, para os valores de $\beta=0,25$ e $0,50$, de acordo com E_1 , o melhor desempenho foi obtido pela MSSo_T, mas segundo o IQD, a RRes_T foi a que melhor estimou a CR. O fato de E_1 trabalhar em módulo e o IQD penalizar as subestimativas pode explicar essa diferença.

Apesar das divergências a respeito do desempenho das metodologias na RHH2 para $\beta=0,25$ e $0,50$, a maior frequência em que a MSSo_T se apresenta como a melhor metodologia, tanto considerando o E_1 quanto o IQD, justifica sua adoção para qualquer valor de β .

4.2.2. Dimensionamento da capacidade do reservatório por diferentes metodologias considerando demanda variável

4.2.2.1. Análise preliminar dos dados

Assim como na demanda fixa, avaliou-se a frequência de ocorrência das FDP para definir qual seria utilizada para associar a CR aos Ts considerados (Tabela 9).

Tabela 9. Frequência de ocorrência das funções de densidade de probabilidade na RHH1 e RHH2 considerando demanda variável

	Frequência de ocorrência (%)		
	Regra de operação anual		
	Log Normal 3	Pearson	Gumbel
RHH1	90,3 %	2,8 %	6,9 %
RHH2	87,2 %	8,3 %	4,5 %

A função mais frequente foi a Log Normal 3, sendo adotada sem prejuízo dos resultados, uma vez que a maior variação observada foi entre esta e Gumbel, com diferença de 10% no valor da CR. Uma vez definida a FDP, as CR associadas ao T desejado foram estimadas.

4.2.2.2. Capacidades de reservatório geradas pelas diferentes metodologias: exemplo numérico para uma seção da hidrografia

Na Figura 14 são apresentados os valores de CRs estimados pelas metodologias MSSr, MSSo, MSSr_T, MSSo_T, MSO_T, RCRes e RCRes_T. Nesta análise, a RCReg não aparece pois não permite a consideração de uma demanda variável no tempo. Neste sentido, a adoção das metodologias RCRes, MSSr e MSSo já configura um ganho em representatividade da CR.

Analisando a Figura 14 percebe-se a repetição do valor da CR mesmo com variação do T nas metodologias RCRes, MSSr e MSSo, as quais superestimaram a CR nos três cenários de demanda. As superestimativas tendem a diminuir com o aumento do T.

Apesar das metodologias RCRes, MSSr e MSSo terem apresentado comportamento semelhante, a MSSr e a MSSo exibiram maiores discrepâncias em relação à metodologia de referência (MSO_T). Tais metodologias tenderam a superestimar a CR em maior magnitude que a RCRes. Assim, dentre as três, a metodologia RCRes apresentou melhor desempenho, ainda que este não tenha sido muito superior ao exibido pelas metodologias MSSr e MSSo.

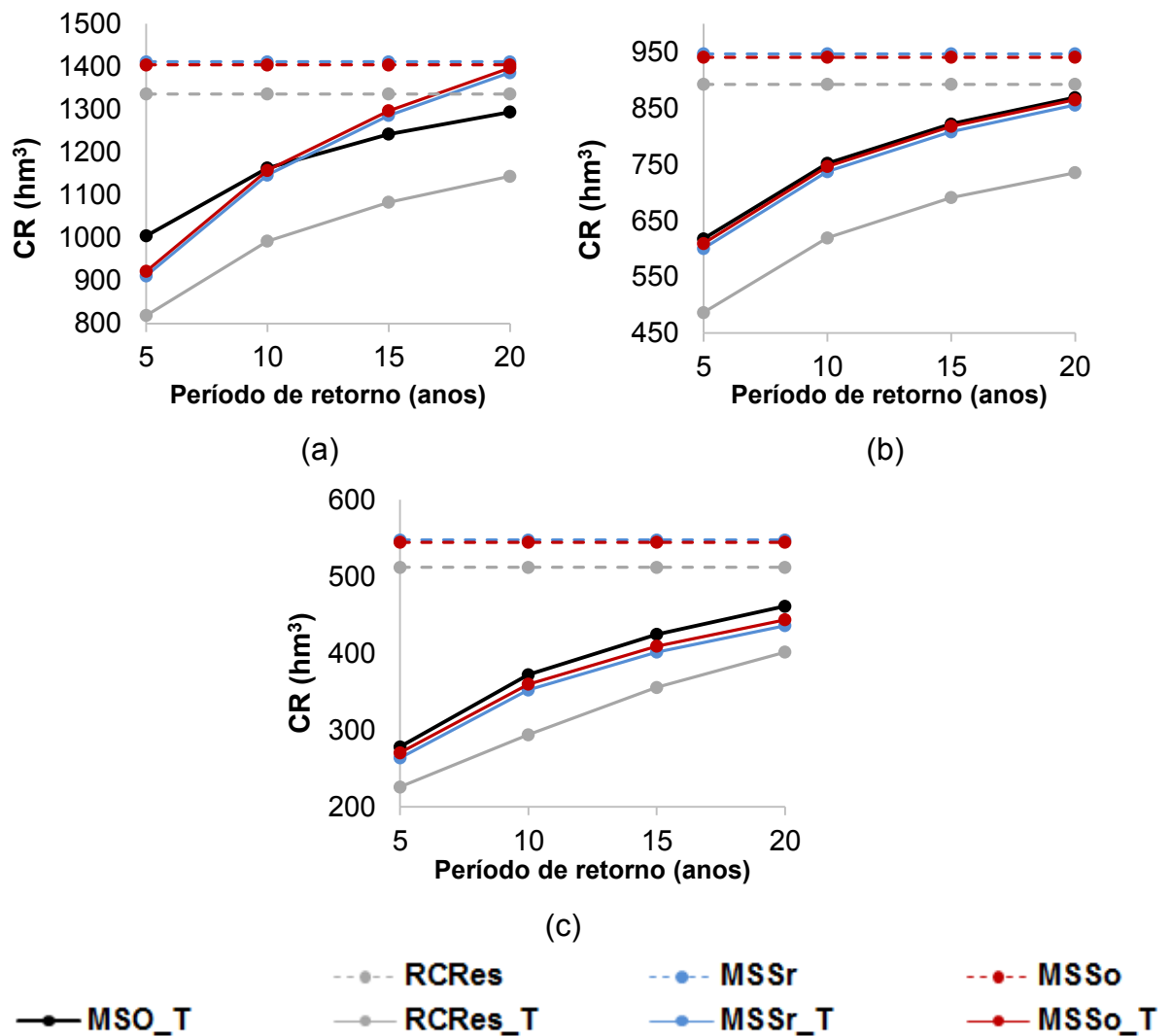


Figura 14. Capacidades do reservatório por período de retorno considerando os cenários de demanda variável: $(50\%Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - RI$ (a), $(40\%Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - R$ (b), e $(30\%Q_{mlt} - 50\%Q_{7,10}) - RI$ (c) para a estação fluviométrica 42395000 para demanda variável.

Neste sentido, apesar das metodologias RCRRes, MSSr e da MSSo já serem superiores à RCRReg, por possibilitarem a adoção da demanda variável, a utilização de metodologias que contemplem a associação da CR com um T, embora envolva um caráter de complexidade maior, é mais recomendada. Como os processos hidrológicos tem uma incerteza inerente, a estimativa da confiabilidade de um reservatório, a qual pode ser obtida pela utilização do T, é de extrema importância (Bayazit; Bulu, 1991; Koutsoyiannis, 2005b; Koutsoyiannis, 2005c).

O planejamento do uso da água é um tema que exige prioridade, especialmente nas regiões onde já se tem conflitos pelo uso desse recurso. Nesses locais, muitas vezes, a água, e não a terra, é o recurso mais limitador

para a melhoria da produção agrícola. Neste contexto, metodologias mais eficientes de dimensionamento de reservatórios devem ser adotadas (Oweis; Hachum, 2006).

A sub-bacia do Entre Ribeiros, localizada na sub-bacia do Paracatu, é uma região onde já se tem conflitos pelo uso da água. Ela já se encontra em situação crítica em relação à disponibilidade hídrica, e a irrigação é responsável por mais de 92% do consumo total de água (Pruski et al., 2007). Nunes e Pruski (2015b) relataram que, em condições a fio d'água, 49,3% dos trechos impactados por outorgas apresentaram somatório das vazões demandadas maiores que a vazão máxima outorgável. Oliveira et al. (2013) verificaram que mesmo com a substituição do critério de outorga anual para mensal (menos restritivo) isso não seria suficiente para garantir que a demanda fosse atendida em todos os segmentos hidrográficos.

Nunes e Pruski (2015b), ainda para a sub-bacia do Entre Ribeiros, ressaltam que, quando da consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério a fio d'água, a disponibilidade hídrica aumentaria em até 1610%, mas, mesmo com uma regularização de 100% da Q_{mit} , em 5,9% dos trechos com necessidade de regularização as demandas não poderiam ser atendidas.

Apesar dos agricultores dependerem da água para desenvolver uma agricultura mais tecnificada e competitiva, e que, em muitos locais, isso só é possível devido a reservação de água, o que se nota no campo é um grande empirismo. Como em geral não se tem o conhecimento da disponibilidade hídrica de forma contínua (dados diários), os reservatórios são dimensionados para armazenar a maior quantidade de água possível. O desejo da maioria dos irrigantes é tornar o reservatório além de útil para irrigação, uma obra para embelezar a propriedade. Centenas de reservatórios são construídos sem embasamento científico, às vezes com ajuda de equipamentos da prefeitura ou do Estado (Fontenelle, 2007). No entanto, mesmo sendo obras de pequeno porte, deve-se considerar o efeito cumulativo destas em uma bacia, pois tal acumulação pode implicar em impactos sociais, ambientais e econômicos até maiores que uma obra de grande porte (Silveira, 2005).

A utilização de metodologias que primem pela segurança hídrica deve ser analisada com bom senso, já que a demanda variável é mais aplicável a reservatórios destinados à irrigação, os quais não necessitam trabalhar com

riscos tão baixos. Muitas culturas irrigadas podem tolerar alguns dias sem serem atendidas. Ademais, a superestimativa da CR pode causar impactos negativos do ponto de vista financeiro, ambiental e social, tal como discutido quando se considerou uma demanda fixa no tempo.

Por outro lado, se os reservatórios dimensionados não proporcionarem segurança hídrica, os impactos negativos por não atender a demanda de irrigação também podem trazer prejuízos. A tentativa de minimização da estiagem na produção agrícola continua a ser um grande impulso para a construção de reservatórios em grande parte do mundo (Vörösmarty et al. 2003). Entretanto, se não atenderem a demanda, pode ocorrer o êxodo rural. Neste sentido, a busca pela segurança hídrica também tem a finalidade de manter o irrigante no seu ambiente natural, amenizando os processos migratórios (CBDB, 2011).

Neste sentido, a adoção de metodologias que contemplem a associação da CR do com o T, podem proporcionar maior segurança hídrica com menores impactos negativos, sendo uma alternativa ao demasiado empirismo muitas vezes empregado no dimensionamento de reservatórios.

Diferentemente do que ocorre na RCRes, MSSr e na MSSo, os valores de CR estimados a partir da RCRes_T, MSSr_T e MSSo_T variam à medida que o T é alterado (Figura 14), apresentando assim um comportamento diferente do exibido pelas metodologias RCRes, MSSr e MSSo.

Dentre as metodologias que consideram o T (RCRes_T, MSSr_T e MSSo_T), a RCRes_T foi a que apresentou o pior desempenho. A RCRes_T apresentou os comportamentos mais discrepantes em relação à MSO_T para os três cenários de demanda. Esta metodologia apresentou tendência de subestimativa da CR, e estas foram maiores que as exibidas pelas metodologias MSSr_T e MSSo_T (Figura 14b e 14c). Este comportamento revela uma menor segurança hídrica proporcionada por esta metodologia.

As metodologias MSSr_T e MSSo_T, por outro lado, acompanharam o comportamento da MSO_T para os três cenários de demanda, não exibindo discrepâncias como as que ocorreram na RCRes_T. Essas metodologias apresentam uma maior segurança hídrica que a RCRes_T, sendo a MSSo_T ligeiramente superior à MSSr_T, devido sua maior proximidade dos valores de CR estimados pela metodologia de referência (MSO_T). Tal constatação

configura as metodologias MSSr_T e MSSo_T como as mais adequadas ao dimensionamento de reservatórios.

Diante da superioridade das metodologias MSSr_T e MSSo_T em relação às outras, conclui-se que, para a estação 42395000, a metodologia proposta de estimativa de séries sintéticas de vazões diárias quando utilizada para estimar a CR, e quando esta é associada a um T, agregou em qualidade no dimensionamento de reservatórios.

4.2.2.3. Análise conjunta das capacidades de reservatórios geradas para as 14 seções

Na Figura 15 são apresentados, para cada uma das 14 estações, as médias dos valores de ER percentual resultantes de 12 combinações – três cenários de demanda e quatro de T – (colunas); o desvio padrão (barras); os valores máximos de ER percentual (pontos); e os valores médios de ER percentual por RHH (linhas contínuas) por metodologia.

Os resultados verificados na estação 42395000 são corroborados ao se comparar as Figuras 15a e 15b, onde se nota a superioridade das metodologias que associam a CR ao T. Porém, essa superioridade é mais nítida somente na parte positiva do gráfico, ou seja, com relação às superestimativas da CR. Entretanto, considerando as subestimativas da CR, os dois grupos de metodologias apresentaram comportamento similar.

Dentre as metodologias que não consideram o T, a RCRes foi a que mais se distanciou dos valores de referência, apresentando as maiores superestimativas da CR nas duas RHHs. Este comportamento, no entanto, foi diferente do observado quando se analisou somente a estação 4239500, onde as metodologias MSSr e MSSo é que exibiram as maiores superestimativas.

A metodologia RCRes apresentou os maiores valores de ER máximo negativo, e o maior ER máximo positivo, com uma CR superestimada em mais de 370% na estação 42460000. Quando subestima a CR, o faz em maior magnitude em relação às metodologias MSSr e MSSo.

Dentre as metodologias que fazem a associação da CR com o T, pode-se perceber na Figura 15b que a metodologia RCRes_T apresenta uma nítida inferioridade no que diz respeito à magnitude do ER médio por RHH, em

As metodologias MSSr_T e a MSSo_T, apresentaram ER médio negativo quase 60% menor que o evidenciado na RCRes_T. O ER médio positivo também é aproximadamente 60% menor que o exibido na RCRes_T. Os desvios e ER máximo positivo e negativo foram baixos, muito próximos do valor do ER médio. Nesta análise conjunta conseguiu-se fazer a distinção de qual a melhor metodologia dentre a MSSr_T e MSSo_T, sendo a MSSo_T indicada como a mais adequada. Essa constatação sugere que séries sintéticas melhores são obtidas quando se utiliza, para as estações fluviométricas envolvidas, dados observados de q_{mt} ao invés de dados regionalizados.

Em síntese, demonstraram um maior risco de ineficiência de um reservatório em atender a demanda pretendida ou o superdimensionamento quando as seguintes metodologias foram utilizadas: RCRes, MSSo, MSSr, e RCRes_T. Dentre as seis metodologias utilizadas para estimar a CR considerando a demanda variável, a MSSr_T e a MSSo_T se destacaram com os melhores resultados, sendo MSSo_T ligeiramente superior. Esse resultado reitera o observado na estação 42395000.

4.2.2.4. Avaliação das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios

Na Figura 16 são apresentados os valores médios de E_1 por cenário de demanda em cada RHH, os quais foram obtidos pela média dos valores de E_1 nos Ts considerados (T=5; T=10; T=15; e T=20).

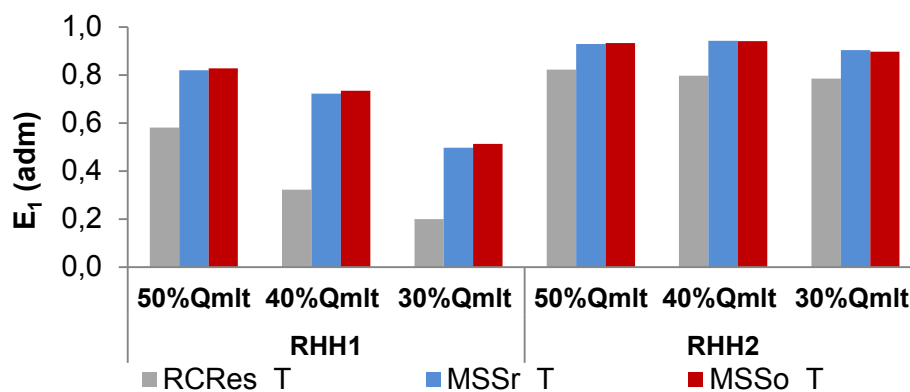


Figura 16. Índice de Nash-Sutcliffe modificado para cada cenário de demanda na RHH1 e RHH2 considerando demanda variável.

As metodologias MSSr_T e a MSSo_T se destacaram em relação à RCRes_T. Na RHH1, a metodologia RCRes_T se mostrou insatisfatória, segundo o índice E_1 , para dois cenários de demanda, e satisfatória para um cenário. Já na RHH2, essa metodologia apresentou resultados melhores, apesar de ter um desempenho inferior às metodologias MSSr_T e a MSSo_T.

A MSSr_T e a MSSo_T foram as metodologias que apresentaram, para todos os cenários analisados, os melhores valores de E_1 . Na RHH1, notou-se que, à medida que se diminui a disponibilidade hídrica, a capacidade preditiva das três metodologias piora. Na RHH2 isso não foi evidenciado.

Na Tabela 10 pode ser visualizado o ranqueamento das metodologias quanto ao seu desempenho.

Tabela 10. Metodologias que apresentaram melhores desempenhos para estimar a CR para cada cenário e T por RHH considerando o índice E_1 e, a variação percentual entre o valor de E_1 da melhor metodologia e da MSSo_T para demanda variável

Cenário	T	Melhor	2ª Melhor	$\Delta\%$ Melhor e MSSo_T
50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSo_T	MSSr_T	0
RHH1 40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSo_T	MSSr_T	0
30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSo_T	MSSr_T	0
50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSr	MSSo	-1
RHH2 40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSo_T	MSSr_T	0
30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
	10	MSSo_T	MSSr_T	0
	15	MSSo_T	MSSr_T	0
	20	MSSo_T	MSSr_T	0

Pode-se concluir que a metodologia MSSo_T apresentou melhor desempenho em, aproximadamente, 97% dos casos. Em apenas um caso ela não se apresentou nem como a segunda metodologia com melhor desempenho (cenário 50%Q_{mlt} - 50%Q_{7,10}, para T=20), mas ainda assim ela pode ser adotada pois a diferença percentual foi de apenas -1%.

Na Figura 17 são apresentados os valores médios de IQD por cenário de demanda em cada RHH, os quais foram obtidos pela média dos valores de IQD nos Ts considerados (T=5; T=10; T=15; e T=20).

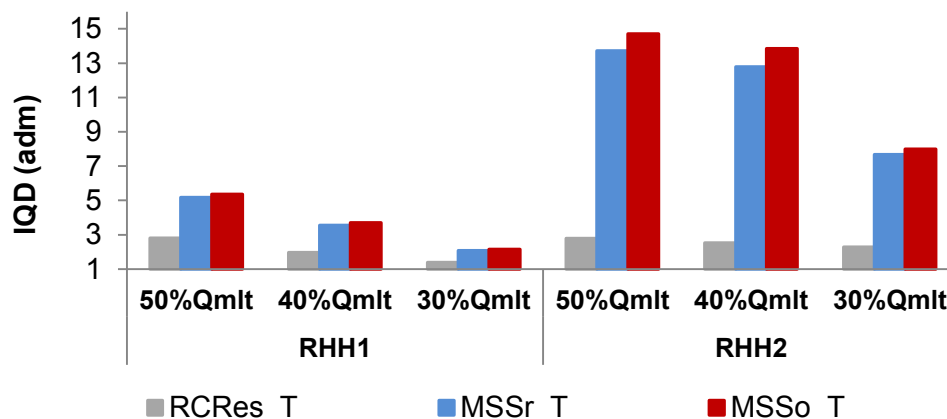


Figura 17. Índice de qualidade de dimensionamento para cada cenário de demanda na RHH1 e RHH2, para demanda variável.

Confirmando o que foi observado com o índice E_1 , o pior desempenho na estimativa da CR foi apresentado pela metodologia RCRes_T. Essa diferença de desempenho é mais pronunciada na RHH2. De forma geral, as três metodologias tenderam a piorar o desempenho na estimativa da CR quando o cenário de disponibilidade hídrica é mais restritivo.

Em análise geral, as metodologias MSSr_T e MSSo_T foram as que apresentaram os maiores valores de IQD nas duas RHHs, sendo a MSSo_T superior. Essa superioridade é mais acentuada na RHH2. Segundo o IQD, essas metodologias conferem maior segurança hídrica que a RCRes_T.

Percebe-se que quanto mais o cenário de demanda fica restritivo quanto à disponibilidade hídrica, o desempenho das três metodologias em estimar a CR piora, o que foi verificado nas duas RHHs.

O ranqueamento das metodologias quanto ao seu desempenho, pode ser visualizada na Tabela 11. A metodologia MSSo_T apresentou melhor desempenho em, aproximadamente, 88% dos casos. Mesmo quando não apresentou o melhor desempenho, ainda assim pode ser substituída pela que apresentou maior valor de IQD sem prejuízo dos resultados, pois a maior diferença percentual verificada foi de apenas 9%.

Tabela 11. Metodologias que apresentaram melhores desempenhos para cada cenário e T por RHH considerando o índice IQD e, a variação percentual entre o valor de IQD da melhor metodologia e da MSSo_T para demanda variável

	Cenário	T	Melhor	2ª Melhor	Δ % Melhor e MSSo_T
	50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSo_T	MSSr_T	0
		15	MSSr	MSSo	-4
		20	MSSr	MSSo	-9
RHH1	40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSo_T	MSSr_T	0
		15	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSr	MSSo	-4
	30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSo_T	MSSr_T	0
		15	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
	50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSr_T	MSSo_T	-2
		15	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
RHH2	40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSo_T	MSSr_T	0
		15	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0
	30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}	5	MSSo_T	MSSr_T	0
		10	MSSo_T	MSSr_T	0
		15	MSSo_T	MSSr_T	0
		20	MSSo_T	MSSr_T	0

Em síntese, na Tabela 12 são apresentadas as metodologias que apresentaram melhor desempenho para estimar a CR em cada cenário de demanda e cada RHH, considerando os índices E_1 e IQD.

Tabela 12. Metodologias que apresentaram melhor desempenho para estimar a CR em cada cenário de demanda e em cada RHH, considerando os índices E_1 e IQD para demanda variável

	Cenário de demanda	E_1	IQD
RHH1	(50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T
	(40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T
	(30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T
RHH2	(50%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T
	(40%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T
	(30%Q _{mlt} - 50%Q _{7,10}) - RI	MSSo_T	MSSo_T

Tanto considerando E_1 como IQD, a metodologia MSSo_T apresenta melhor desempenho. Mesmo com a convergência dos índices, existe a influência do fator peso em IQD, que penaliza as subestimativas da CR. Assim, a metodologia MSSo_T, além de fornecer os menores erros absolutos entre a

CR calculada pela MSO_T e a CR estimada pela metodologia em análise, ainda é a metodologia que menos subestimou a CR.

5. CONCLUSÕES

- O uso de séries sintéticas de vazões se caracterizou como um procedimento eficiente para o dimensionamento de reservatórios de regularização de vazões visando o aumento da disponibilidade de água em período de estiagem;
- a metodologia RCR_{Reg}, normalmente recomendada na literatura para estimar a capacidade de reservatórios em locais sem monitoramento fluviométrico, foi a que apresentou o pior desempenho entre as sete metodologias analisadas;
- o índice de qualidade de dimensionamento (IQD), proposto neste trabalho, constitui em um critério de decisão importante no processo de avaliação da eficiência das metodologias de estimativa da capacidade de reservatórios de regularização, sendo este índice um fator de incentivo ao aumento da segurança hídrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aksoy, H. (2001). Storage capacity for river reservoirs by wavelet-based generation of sequent-peak algorithm. *Water Resources Management*, 15(6), 423-437.

Albuquerque Filho, J. L., Saad, A. R., & de Alvarenga, M. C. (2010). Considerações acerca dos impactos ambientais decorrentes da implantação de reservatórios hidrelétricos com ênfase nos efeitos ocorrentes em aquíferos livres e suas conseqüências. *Geociências (São Paulo)*, 29(3), 355-367.

Albuquerque, J. P. T., & Rego, J. C. (1998). Conceitos e definições para avaliação e gerenciamento conjunto de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Anais: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande,

ANA - Agência Nacional de Águas(2012). *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe 2012*. Ed. Especial. Brasília, Brasil.

Araújo, J. C., de Melo, A. M. C., & de Freitas, J. C. A. (2004). Otimização da altura de uma barragem de terra homogênea. *Revista Tecnologia*, 25(1).

Arnell, N. W. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 31-52.

ASCE Task Committee. (1993). Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119, 429-442.

ASCE - American Society of Civil Engineers (1996). Hydrology handbook. *ASCE Publications, Reston, VA*, Second ed. ASCE.

Bayazit, M., & Bulu, A. (1991). Generalized probability distribution of reservoir capacity. *Journal of Hydrology*, 126(3), 195-205.

Bayer, F. M.; Souza, A. M.(2010). Wavelets e modelos tradicionais de previsão: Um estudo comparativo. *Revista Brasileira de Biometria*. v.28, p.40-61.

Besaw, L. E., Rizzo, D. M., Bierman, P. R., & Hackett, W. R. (2010). Advances in ungauged streamflow prediction using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 386(1), 27-37.

Biemans, H., T. Bresser, H. Van Schaik, and P. Kabat (2006), Water and Climate Risks: A Plea for Climate Proofing of Water Development Strategies

and Measures, 38 pp., Co-operative Programme on Water and Clim., Wageningen, Netherlands.

Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological processes*, 9(3-4), 251-290.

Briscoe, J. (2011). Making reform happen in Water Policy: Reflections from a practitioner. *Background paper for the OECD Forum on Environment: Making Reform Happen*, Paris.

Bruinsma, J. (2009). The Resource Outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Prepared for the FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050', Rome, 24–26.

Bocchiola, D., Mihalcea, C., Diolaiuti, G., Mosconi, B., Smiraglia, C., & Rosso, R. (2010). Flow prediction in high altitude ungauged catchments: a case study in the Italian Alps (Pantano Basin, Adamello Group). *Advances in Water Resources*, 33(10), 1224-1234.

Bof, L. H. N., Pruski, F. F., da Silva, L. M. C., & Justino, F. (2013). Analysis of Appropriate Timescales for Water Diversion Permits in Brazil. *Environmental management*, 51(2), 492-500.

Bulygina, N., McIntyre, N., and Howard, W. (2011). "Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes." *Water Resources Research*, 47(2).

Buttle, J. M., & Eimers, M. C. (2009). Scaling and physiographic controls on streamflow behaviour on the Precambrian Shield, south-central Ontario. *Journal of Hydrology*, 374(3), 360-372.

Camparotto, L. B., Blain, G. C., Giarolla, A., Adami, M., & CAMARGO, M. (2013). Validação de dados termopluviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(6), 665-671.

Campos, J. N. B. (1996). *Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização*. Universidade Federal do Ceará. 117 pags.

Castellarin, A., Camorani, G., & Brath, A. (2007). Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30(4), 937-953.

Castiglioni, S., Lombardi, L., Toth, E., Castellarin, A., & Montanari, A. (2010). Calibration of rainfall-runoff models in ungauged basins: A regional maximum likelihood approach. *Advances in Water Resources*, 33(10), 1235-1242.

CBDB (2011). A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB.

Chechi, L., & Bayer, F. M. (2012). Modelos univariados de séries temporais para previsão das temperaturas médias mensais de Erechim, RS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, 16(12).

Chiang, S. M., Tsay, T. K., & Nix, S. J. (2002). Hydrologic regionalization of watersheds. II: Applications. *Journal of water resources planning and management*, 128(1), 12-20.

Christofidis, D. (2008). Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável. *Revista Ciências Exatas*, 12(1).

Chua, L. H., & Wong, T. S. (2011). Runoff forecasting for an asphalt plane by Artificial Neural Networks and comparisons with kinematic wave and autoregressive moving average models. *Journal of Hydrology*, 397(3), 191-201.

Coelho, E. F., Coelho Filho, M. A., & Oliveira, S. D. (2005). Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. *Bahia Agrícola*, 7(1), 57-60.

Coser, M. C. (2011). Modelagem estocástica de séries mensais apresentando dependência de longo termo para dimensionamento de reservatórios de regularização. Tese de doutorado Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

Cutore, P., Cristaudo, G., Campisano, A., Modica, C., Cancelliere, A., & Rossi, G. (2007). Regional models for the estimation of streamflow series in ungauged basins. *Water resources management*, 21(5), 789-800.

Dawson, C. W., & Wilby, R. L. (2001). Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in physical Geography*, 25(1), 80-108.

Diagnóstico Ambiental da Sub-Bacia do Ribeirão Entre Ribeiros (2003). Paracatu. *Irriplan Engenharia Ltda*.

Domokos, M., & Gilyén-Hofer, A. (1990). Regionalized estimation of reservoir capacity-yield curves in Hungary. *IAHS-AISH publication*, 191, 239-251.

Euclides, H. P., Sousa, E. F., Ferreira, P. A., Rubert, A. V., & Santos, W. L. (1999). RH 3.0 - *Regionalização hidrológica: manual do programa*. Viçosa, MG: UFV/DEA.

Fayaed, S. S., El-Shafie, A., & Jaafar, O. (2013). Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(7), 1751-1772.

Fearnside, P. M. (2005). Brazil's Samuel Dam: Lessons for hydroelectric development policy and the environment in Amazonia. *Environmental Management*, 35(1), 1-19.

Fill, H. D. O. A., Neira, K. L. (2005). Curvas de regularização para reservatórios parcialmente cheios e confiabilidade constante. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 13 n.1, 99-109.

Fontenelle, A. D. S. (2007). Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro-estudo de caso: barragens do estado do Ceará. *Tese de doutorado*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – Ceará.

Getirana, A. C. V., de Azevedo, J. P. S., & de Magalhães, P. C. (2007). Conflitos Pelo Uso da Água no Setor Agrícola no Norte Fluminense (II): Processo Decisório Através do Modelo Grafo para Solução de Conflitos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 12(2)*, 27-38.

Gomide, F. L. S. (2012). Sobre Reservatórios e Segurança Hídrica. *Organização Industrial e Engenharia*, Curitiba.

Goodwin, P., Jorde, K., Meier, C., & Parra, O. (2006). Minimizing environmental impacts of hydropower development: transferring lessons from past projects to a proposed strategy for Chile. *Journal of hydroinformatics*, 8(4), 253-270.

Goswami, M., O'connor, K. M., & Bhattarai, K. P. (2007). Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, 333(2), 517-531.

Göttinger, J., & Bárdossy, A. (2007). Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 333(2), 374-384.

GPRH - IGAM (2012). *Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do Processo de outorga no Estado de Minas Gerais*. (1ª ed). Belo Horizonte.

Guo, S., Zhang, H., Chen, H., Peng, D., Liu, P., & Pang, B. (2004). A reservoir flood forecasting and control system for China. *Hydrological sciences journal*, 49(6), 959-972.

Hajilal, M. S., Rao, N. H., & Sarma, P. B. S. (1998). Real time operation of reservoir based canal irrigation systems. *Agricultural water management*, 38(2), 103-122.

Hauschild, M., & Döll, P. (2000). *Water use in semi-arid Northeastern Brazil—Modeling and scenario analysis*. Kassel world water series, 2.

He, Y., Bárdossy, A., & Zehe, E. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3539-3553.

Heuvelmans, G., Muys, B., & Feyen, J. (2006). Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*, 319(1), 245-265.

Hughes, D. A., & Hannart, P. (2003). A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological in stream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270(3), 167-181.

Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292(1), 281-295.

Isik, S., & Singh, V. P. (2008). Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(9), 824-834.

Jain, S. K., & Bhunya, P. K. (2008). Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir/Confiance, résilience et vulnérabilité d'un barrage multi-objectifs. *Hydrological sciences journal*, 53(2), 434-447.

Jin, X., Xu, C. Y., Zhang, Q., & Chen, Y. D. (2009).Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south China. *Quaternary International*, 208(1), 129-137.

Kingston, G. B., Maier, H. R., & Lambert, M. F. (2005).Calibration and validation of neural networks to ensure physically plausible hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 314(1), 158-176.

Kiralj, R., & Ferreira, M. (2009). Basic validation procedures for regression models in QSAR and QSPR studies: theory and application. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20(4), 770-787.

Kite, G. W., 1988.Frequency and Risk Analyses in Hydrology.Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 257 pp.

Koutsoyiannis, D. (2005a). Reliability concepts in reservoir design. *The encyclopedia of Water*.1-17.

Koutsoyiannis, D. (2005b). Stochastic simulation of hydrosystems. *The encyclopedia of Water*.1-22.

Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.

Laaha, G., & Blöschl, G. (2006).A comparison of low flow regionalisation methods-catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323(1), 193-214.

Legates, D. R., McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of" goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.

Legates, D. R., & McCabe, G. J. (2013). A refined index of model performance: a rejoinder. *International Journal of Climatology*, 33(4), 1053-1056.

Li, X., Guo, S., Liu, P., & Chen, G. (2010). Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal of hydrology*, 391(1), 124-132.

Li, Y. P., Huang, G. H., & Nie, S. L. (2010).Planning water resources management systems using a fuzzy-boundary interval-stochastic programming method. *Advances in Water Resources*, 33(9), 1105-1117.

Lima, C. H., & Lall, U. (2010). Spatial scaling in a changing climate: A hierarchical bayesian model for non-stationary multi-site annual maximum and monthly streamflow. *Journal of Hydrology*, 383(3), 307-318.

Liu, P., Guo, S., Xiong, L., Li, W., & Zhang, H. (2006). Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model. *Water resources management*, 20(3), 337-357.

Loucks, D. P., Van Beek, E., Stedinger, J. R., Dijkman, J. P., & Villars, M. T. (2005). *Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications*. Paris: Unesco.

Maidment, D.R., (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York.

Maier, H. R., & Dandy, G. C. (2000). Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental modelling & software*, 15(1), 101-124.

Masih, I., Uhlenbrook, S., Maskey, S., & Ahmad, M. D. (2010). Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. *Journal of hydrology*, 391(1), 188-201.

Mello, E. L., Oliveira, F. A., Pruski, F. F., & Figueiredo, J. C. (2008). Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. *Eng. Agríc.*, 28(4).

Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. (2012). A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*.

Merz, R., & Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287(1), 95-123.

Mishra, A. K., & Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics*, 47(2).

Mohamoud, Y. M. (2008). Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 706-724.

Molina, S. K. M., de Almeida, I. K., Luiz, J., & Steffen, T. A. S. (2014). Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. *Geociências*, 33, 506-515.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe*, 50(3), 885-900.

- Naghetini, M., Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM. 561 p.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Novaes, L. F., Pruski, F. F., de Queiroz, D. O., Rodriguez, R. d. G., Silva, D. D., & Ramos, M. M. (2009). Modelo para a Quantificação da Disponibilidade Hídrica: Parte 2 - Análise do Comportamento do Modelo para a Estimativa da Q7, 10 na Bacia do Paracatu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(1), 27-39.
- Nunes, A. A., & Pruski, F. (2015a). Improving the determination of reservoir capacities for drought control. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1(29), 183-191.
- Nunes, A. A.; Pruski, F. F. (2015b)..*The effect of reservoirs on water availability*.*Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 7-15, 2015.
- Obregon, E., Tucci, C. E., & Goldenfum, J. A. (1999).Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS.*Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4(1), 57-75.
- Oğuz, B., & Bayazit, M. (1991).Statistical properties of the critical period.*Journal of Hydrology*, 126(3), 183-194.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3).
- Oweis, T., & Hachum, A. (2006).Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80(1), 57-73.
- Oliveira, J. R., Pruski, F. F., & de Araújo Nunes, A. (2013). Otimização do Aproveitamento da Disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre/RS*, 18(14), 157-172.
- Pandey, G. R., & Nguyen, V. T. V. (1999). A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 225(1), 92-101.
- Parada, L. M., & Liang, X. (2010).A novel approach to infer streamflow signals for ungauged basins. *Advances in water resources*, 33(4), 372-386.
- Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2005).A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 9(3), 157-171.

- Pavan, W., Fernandes, J. M. C., Hölbig, C. A., & Fraisse, C. W. (2009). Padrões de projeto aplicados a modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 1(1), 15-29.
- Pegram, G. G. S. (1980). On reservoir reliability. *Journal of Hydrology*, 47(3), 269-296.
- Pinheiro, V. B., & Naghettini, M. (2010). Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(2), 143-156.
- Pomeroy, J. W., Spence, C., & Whitfield, P. H. (2013). Putting prediction in ungauged basins into practice. *Canadian Water Resources Association: Ottawa, ON, Canada*, 1-12.
- Post, D. A., Jones, J. A., & Grant, G. E. (1998). An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. *Environmental modelling & software*, 13(3), 395-403.
- Pruski, F. F., Rodriguez, R., Novaes, L. D., Silva, D. D., Ramos, M. M., & Teixeira, A. D. F. (2007). Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(2), 199-210.
- Pruski, F. F., Nunes, A., Rego, F. S., & Souza, M. (2012). Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. *Water Resources and Irrigation Management*, 1(1), 51-59.
- Pruski, F. F., de Araújo Nunes, A., Pruski, P. L., & del Giudice Rodriguez, R. (2013). Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. *Journal of hydrology*, 476, 52-71.
- Ramos, M. M., & Pruski, F. F. (2003). Quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na Bacia do São Francisco. *Relatório do Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na Bacia do São Francisco*.
- Ramos, M. C. A. (2016). Critérios de valoração da água com base na sazonalidade das vazões e na efetiva demanda hídrica das culturas. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.
- Rao, A. R., & Srinivas, V. V. (2006). Regionalization of watersheds by fuzzy cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318(1), 57-79.
- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958-975.

Rodrigues, N. C. (2013). Modelagem da disponibilidade hídrica natural na bacia do rio Paracatu em cenário de mudanças climáticas. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

Rodriguez, R.G.; Pruski, F.F.; Novaes, L.F. Ramos, M.M.; Silva, D.D.; Teixeira, A.F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da bacia do rio Paracatu. *Engenharia Agrícola*, v. 27(1), p.172-179, 2007

Rosa, L. P., Schaeffer, R., & dos Santos, M. A. (1996). Are hydroelectric dams in the Brazilian Amazon significant sources of 'greenhouse' gases?. *Environmental Conservation*, 23(01), 2-6.

Samuel, J., Coulibaly, P., & Metcalfe, R. A. (2011). Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 447-459.

Santos A. B., & Cesconetto L. B. (2014). Dimensionamento de reservatório de regularização de vazões para uma seção da bacia do ribeirão Entre Ribeiros. (*Monografia*), Viçosa, Universidade Federal de Viçosa.

Sattari, M. T., Apaydin, H., & Ozturk, F. (2009). Operation analysis of Elevation irrigation reservoir dam by optimization and stochastic simulation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(8), 1187-1201.

Sawunyama, T. E. N. D. A. I., Senzanje, A., & Mhizha, A. (2006). Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15), 935-943.

Setti, A. A., Lima, J. E. F. W., Chaves, A. D. M., & Pereira, I. D. C. (2000). *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. Agência Nacional de Energia Elétrica; Agências Nacionais de Águas, 3ª ed., Brasília.

Shoab, S. A., Bárdossy, A., Wagener, T., Huang, Y., & Sultana, N. (2013). A Different Light in Predicting Ungauged Basins: Regionalization Approach Based on Eastern USA Catchments. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(3), 364-378.

Silva, M. V. (2014) Adequação da disponibilidade hídrica com a demanda de água na agricultura. *Tese de doutorado*, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

Silva, R. T. D., Sánchez-Román, R. M., Teixeira, M. B., Franzotti, C. L., & Folegatti, M. V. (2013). Software for calculation of reservoir active capacity with the sequent-peak algorithm. *Engenharia Agrícola*, 33(3), 501-510.

Silveira, G. D., & Cruz, J. C. (2005). Seleção ambiental de barragens: análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica. UFSM, ABRH, RS.

Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., ... & Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857-880.

Song, J. X., Xu, Z. X., Liu, C. M., & Li, H. E. (2007). Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River—the largest tributary of the Yellow River. *Hydrological processes*, 21(8), 1066-1073.

Sousa, H. D. (2013). *Sistema computacional para regionalização de vazões - SisCoRV 1.0*. Brasília, DF: ANA; Viçosa, Minas Gerais, UFV.

Sousa, H. T., Pruski F. F., Bof L. H. N., Cecon, P.R., & Souza, J. R. C. (2009). *Sistema Computacional para Análises Hidrológicas – SisCAH 1.0*. Brasília, DF: ANA; Viçosa, Minas Gerais, UFV.

Spence, C., Whitfield, P. H., Pomeroy, J. W., Pietroniro, A., Burn, D. H., Peters, D. L., & St-Hilaire, A. (2013). A review of the Prediction in Ungauged Basins (PUB) decade in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 38(4), 253-262.

Stevaux, J. C., Martins, D. P., & Meurer, M. (2009). Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, 113(3), 230-238.

Thyer, M., Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Franks, S., & Srikanthan, S. (2008). Investigating the impact of predictive uncertainty in rainfall-runoff modelling on storage reliability estimates using bayesian total error analysis. *World Environmental and Water Resources Congress*.

Tucci, C. E. M. (1997). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4.

Tucci, C. E., Hespanhol, I., & Netto, O. D. M. C. (2000). Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a “Visão Mundial da Água”. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5, 31-43.

Tucci, C. E. (2002). *Regionalização de vazões*. Editora da Universidade/UFRGS. 256 pp.

Vasconcelos, V. V., Hadad, R. M., & Martins Junior P. P. (2012). Estudos hidrológicos sobre a bacia de Entre-Ribeiros e avaliação do impacto do uso consuntivo de água para irrigação. *REGA – 9(2)*, 47-61.

Vogel, R. M., & Bolognese, R. A. (1995). Storage-Reliability-Resilience-Yield Relations for Over-Year Water Supply Systems. *Water Resources Research*, 31(3), 645-654.

Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and planetary change*, 39(1), 169-190.

Xu, Z. X., Ito, K., Liao, S., & Wang, L. (1997). Incorporating inflow uncertainty into risk assessment for reservoir operation. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 11(5), 433-448.

Zhang, Y., and Chiew, F. H. S. (2009). Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research*. 1-13.

WCD, 200. World Commission On Dams. *Dams and development a new framework the report of the world commission on dams*.

Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical geography*, 2(2), 184-194.

Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., ... & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 90(C5), 8995-9005.

Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094.

Wimssr, D., Frolking, S., Douglas, E. M., Fekete, B. M., Schumann, A. H., & Vörösmarty, C. J. (2010). The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production—A global-scale analysis. *Journal of Hydrology*, 384(3), 264-275.

Woo, M. K., and Thorne, R. (2003). Streamflow in the Mackenzie Basin, Canada. *Arctic*, 56(4), 328–340.

World Meteorological Organization (WMO) (1996). *The adequacy of hydrological networks: A global assessment*. Geneva, Switzerland., 56 pp.,

Wurbs, R. A. (2005). Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *Journal of Hydrology*, 300(1), 100-113.

WWAP-UNESCO (2015). *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – Água para um mundo sustentável*. World Water Assessment Programme -WWAP . UNESCO 06134 Colombella, Perugia, Itália.

Yadav, M., Wagener, T., & Gupta, H. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1756-1774.

Yevjevich V., Siddiqui, M.M and Downer, R.N. (1967). Application of Runs to hydrologic droughts. *Proceedings of International Hydrology symposium*, Fort Collins, Vol. 1, Paper 63, 496-505.

Yitian, L. I., & Gu, R. R. (2003). Modeling flow and sediment transport in a river system using an artificial neural network. *Environmental management*, 31(1), 122-134.

Young, A. R. (2006). Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1), 155-172.

Yue, S., & Wang, C. Y. (2004). Scaling of Canadian low flows. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18(5), 291-305.

APÉNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A. Diagrama de barras de dados de vazão no período de 1968 a 2005 nas estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Código	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
42435000																			
42440000																			
42460000																			
42490000																			
42540000																			
42545500																			
42546000																			
42600000																			
42250000																			
42251000																			
42255000																			
42257000																			
42290000																			
42395000																			

Quadro 1A. Continuação

Código	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
42435000																			
42440000																			
42460000																			
42490000																			
42540000																			
42545500																			
42546000																			
42600000																			
42250000																			
42251000																			
42255000																			
42257000																			
42290000																			
42395000																			

Legenda: Anos com mais de 95% dos dados