

Não Estacionariedade na Construção de Curvas de Permanência com Vistas à Outorga de Recursos Hídricos

Nonstationarity in building flow duration curves aiming at obtaining water resource permits

Daniel Henrique Marco Detzel¹, Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes² e Miriam Rita Moro Mine³

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Parana, Curitiba, PR, Brasil

daniel@lactec.org.br

^{2,3}Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Parana, Curitiba, PR, Brasil

cris.dhs@ufpr.br; mrmine.dhs@ufpr.br

Recebido: 18/03/15 - Revisado: 04/09/15 - Aceito: 09/09/15

RESUMO

Atividades antrópicas nas bacias hidrográficas são responsáveis por causar mudanças no uso do solo, de modo a ocasionar reflexos nas vazões afluentes de seus rios. Dentre essas consequências está a alteração dos primeiros momentos estatísticos das séries hidrológicas, condição conhecida por não estacionariedade. O emprego de uma série não estacionária pode repercutir em erros relevantes e conclusões tendenciosas nas análises propostas. Dessa maneira, o presente trabalho avalia os possíveis efeitos dessa condição na disponibilidade hídrica para outorga de uso dos recursos hídricos em seis postos hidrométricos brasileiros, considerando como referência a $Q_{95\%}$. Opta-se pelo uso da curva de permanência mediana anual e de curvas de permanência sazonais, determinadas em dois momentos distintos das séries históricas, antes e depois do ano de 1969. Os resultados sugerem aumento da $Q_{95\%}$ em quatro postos e redução nos outros dois. Além disso, alterações importantes foram também identificadas em permanências intermediárias, sugerindo que as variações nas séries não estão limitadas a valores extremos.

Palavras Chave: Estacionariedade estatística. Curva de permanência. Outorga de recursos hídricos

ABSTRACT

Anthropogenic activities in watersheds are responsible for land use changes, thus interfering in its rivers flows. As a consequence, changes occur in the hydrological series statistical moments, a condition known as nonstationarity. The use of a nonstationary time series can cause relevant errors, misleading and biasing the analyses proposed. Therefore, this paper evaluates the possible effects of nonstationarity on water availability for water resources permits in six Brazilian gauging stations, considering $Q_{95\%}$ as reference. Median and seasonal flow duration curves are employed in two distinct periods, before and after 1969, for all series. Results suggested that $Q_{95\%}$ increased in four gauging stations and was reduced in the remaining two. Moreover, major changes were found in intermediate flow durations, suggesting that the variations are not limited to the extreme values in the series.

Keywords: Statistical stationarity. Flow duration curve. Water resources permits

INTRODUÇÃO

Séries temporais são fontes valiosas de informações que podem ser consultadas para caracterização de variáveis nas mais diversas áreas do conhecimento. Em hidrologia, tais séries são de fundamental importância para o entendimento do ciclo hidrológico, sendo empregadas na gestão de sistemas hídricos.

O uso de séries temporais hidrológicas é tradicionalmente considerado em modelos estocásticos que objetivam reproduzir o comportamento de determinado fenômeno. Citam-se como exemplos modelos de geração de séries sintéticas de chuvas (DETZEL; MINE, 2011; RASMUSSEN, 2013) e vazões (DETZEL et al., 2014; NIU; SIVAKUMAR, 2013). Alternativamente, séries hidrológicas são aplicadas no dimensionamento de reservatórios (SILVA; PORTELA, 2013), análises relacionadas à demanda de água (ADAMOWSKI et al., 2012), avaliação da disponibilidade hídrica de rios (CRUZ; TUCCI, 2008), entre muitos outros usos.

Na grande maioria dos estudos, a aplicação das séries temporais hidrológicas requer o conhecimento básico de suas propriedades estatísticas. Evidentemente, por serem originárias de fenômenos naturais, espera-se que essas propriedades sofram variações no decorrer do tempo. Entretanto, as flutuações não devem ser tais a ponto de alterar significativamente os primeiros momentos estatísticos das séries, pois podem comprometer o ajuste de modelos ou as análises realizadas. Se, porventura, as variações forem significativas, as séries são caracterizadas como não estacionárias.

Focando a atenção especificamente em séries de vazões, percebeu-se que ações antrópicas nas bacias hidrográficas foram (e são) responsáveis por induzir elevado grau de não estacionariedade a elas (TUCCI, 2007; TUCCI; BRAGA, 2003). Especula-se também que variações climáticas possam estar causando alterações nos regimes dos rios, embora seja, ainda, um assunto em discussão (SALAS et al., 2012). Independentemente, a detecção da não estacionariedade em séries de vazão é tema de um grande número de trabalhos (BORMANN; PINTER; ELFERT, 2011; FLEMING; WEBER, 2012; GENTA; PEREZ-IRIBARREN; MECHOSO, 1997; MÜLLER; KRÜGER; KAVISKI, 1998; SÁFADI, 2004).

Recentemente, Detzel et al. (2011) apresentaram um estudo para detecção da não estacionariedade em séries de vazões afluentes a 146 usinas hidrelétricas brasileiras integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN). Utilizando seis testes estatísticos difundidos na literatura especializada, concluiu-se que 75 delas tinham evidências de não estacionariedade na média. Em comum aos estudos citados no parágrafo anterior, identificou-se que o início da década de 1970 foi marcante na alteração dos regimes dos rios localizados nas regiões mais ao sul do país. Calculando-se estatísticas básicas referentes aos períodos anterior e posterior a 1969, chegou-se a variações superiores a 25% na vazão média de alguns desses rios.

Avançando a análise para o entendimento dos possíveis efeitos dessa não estacionariedade, propôs-se a realização do presente trabalho. Dentre as diversas formas de estudá-los, optou-se por avaliar as eventuais alterações na disponibilidade hídrica para outorga, sob o contexto da gestão dos recursos hídricos.

A outorga é um dos cinco instrumentos previstos na Lei 9433/97 (BRASIL, 1997), documento que regulamenta a gestão dos recursos hídricos em nosso país. Notadamente complexa por relacionar a disponibilidade hídrica com a demanda, ambas variantes no tempo e no espaço, a outorga é apontada por Cruz e Tucci (2005) como o principal instrumento de gestão da citada Lei 9433/97. Os resultados aqui consolidados destacam a necessidade de um entendimento maior desses efeitos quando da implementação dos demais instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos em lei.

Em comum a grande parte dos estudos de determinação de disponibilidade hídrica, utilizou-se a curva de permanência sobre dados de vazão natural média diária como ferramenta básica para as análises. Após sucinta descrição e forma de obtenção, o artigo mostra a curva de permanência em diferentes momentos da série histórica para seis postos hidrológicos, localizados em usinas hidrelétricas integrantes do SIN. São feitos ensaios também sobre curvas de permanência sazonais, determinadas mês a mês. Frente aos resultados obtidos, discute-se a possível influência da não estacionariedade e eventuais cuidados a serem tomados no emprego de séries com tais características.

DISPONIBILIDADE HÍDRICA VIA CURVA DE PERMANÊNCIA

A curva de permanência é uma ferramenta amplamente difundida entre hidrólogos, principalmente por concentrar um grande número de informações sobre determinado rio em apenas um gráfico. Como apontam Vogel e Fennessey (1995), seu uso é conveniente por conseguir sintetizar elementos complexos da hidrologia de um curso d'água, favorecendo o entendimento de gestores que, eventualmente, não têm conhecimento aprofundado na área. Apesar de não ser o único método de determinação da disponibilidade hídrica outorgável em um rio (e.g. vazão mínima com sete dias de duração e retorno de dez anos, $Q_{7,10}$, WOLFF; DUARTE; MINGOTI, 2014) é, certamente, o mais utilizado.

Em uma curva de permanência relacionam-se a magnitude da vazão (no eixo das ordenadas) com a frequência temporal de excedência (no eixo das abcissas). Tipicamente, lida-se com dados diários, contudo pode ser utilizada qualquer escala temporal disponível. Dada uma determinada amostra de vazões, a curva fornece estimativas da frequência de excedência das magnitudes observadas na amostra. Em outras palavras, o que se tem é a frequência com que uma vazão qualquer foi igualada ou superada dentro do período amostrado. Com finalidade de outorga, comumente emprega-se a vazão de permanência de 95% ($Q_{95\%}$, MÜLLER, 2009). Em muitos estados brasileiros, define-se vazão de outorga em função da natureza de cada bacia hidrográfica e em função de medidas de consenso estabelecida em cada Comitê de Bacia Hidrográfica.

A determinação da curva de permanência pode ser feita, basicamente, de duas formas: (i) ajustando-se distribuições probabilísticas ou (ii) empiricamente. No primeiro caso, distribuições com formas assimétricas são empregadas, em concordância com o comportamento das séries de vazões. LeBoutillier e Waylen (1993) compararam o desempenho das distribuições log-normal,

gama e generalizada de valores extremos na modelagem da curva de permanência. A log-normal foi a que apresentou melhores resultados, embora problemas com a subestimação da variância tivessem que ser corrigidos.

Para a construção da curva empírica, a série de vazões é ordenada de forma decrescente e ranqueada. Matematicamente, seja um conjunto de n observações de vazão q_i , com $i = 1, \dots, n$. Ordena-se a série de forma que q_i e q_n sejam a maior e a menor vazões observadas, respectivamente. A probabilidade de excedência de cada observação é representada pela equação (1):

$$p = 1 - F_Q(q) \tag{1}$$

onde $F_Q(q)$ é a função densidade de probabilidades acumulada das vazões. A cada vazão q_i é associada uma probabilidade de excedência p_i , podendo esta ser estimada de diversas formas. É comum o uso das posições de plotagem de Weibull [equação (2)] que, além de simples, fornecem estimadores não tendenciosos independentemente da distribuição de probabilidades teórica da série de vazões (VOGEL; FENNESSEY, 1994).

$$p_i = \frac{i}{n + 1} \tag{2}$$

Ainda com relação à técnica empírica, identificam-se diferentes abordagens no tocante à seleção do período de referência da série histórica. A forma clássica (BEARD, 1943) emprega toda a série disponível para construir uma única curva. Vogel e Fennessey (1994) criticam esse formato, alegando que é muito susceptível a eventos hidrológicos extremos contidos na série. Alternativamente, estes autores propõem construir uma curva de permanência para cada ano do histórico e, na sequência, determinar uma curva representativa de um ano hipotético, baseada na mediana das curvas anuais. Por esse método abre-se a possibilidade da determinação de intervalos de confiança para as permanências.

Uma terceira abordagem é defendida por Cruz e Tucci (2005) e se refere à determinação de curvas de permanência sazonais especificamente para outorgas. Segundo os autores, as variações da demanda pelo recurso hídrico respeitam as distintas épocas do ano, justificando a estimativa da disponibilidade hídrica em diferentes estações sazonais.

À parte da forma de se obter a curva de permanência, a não estacionariedade pode trazer consequências para a determinação da disponibilidade hídrica. No presente trabalho, essa

questão é investigada primeiramente determinando-se curvas de permanência anuais para os períodos anterior e posterior a 1969 em cada posto de medição. Empregam-se os conceitos de Vogel e Fennessey (1994) na obtenção de uma curva mediana anual. Na sequência são obtidas curvas de permanência sazonais, com base nos meses do ano. Utiliza-se como critério de análise a vazão de permanência de 95% para outorga.

MÉTODOS DE ESTUDO

Para realização das análises foram selecionados postos hidrológicos cujas características aliaram a presença da não estacionariedade (segundo resultados de DETZEL et al., 2011) com a disponibilidade de um bom histórico de vazões. Escolheram-se seis estações localizadas em usinas hidrelétricas brasileiras, cada uma representando regiões hidrológicas distintas. A princípio, esse número de postos poderia ser considerado reduzido, contudo, como será visto adiante, é suficiente para as análises propostas no presente trabalho. A tabela 1 lista os postos selecionados e a figura 1 mostra sua localização.

As séries históricas se referem a vazões naturais médias em escala diária, coletadas diretamente do banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS – www.ons.org.br). Cabe lembrar que essas vazões são consistidas e não pos-

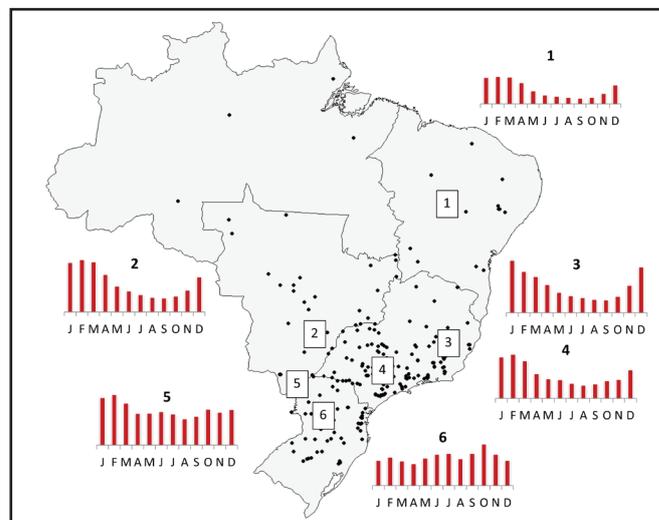


Figura 1 – Localização dos postos hidrológicos estudados e histogramas de MLT mensais. Os números se referem à primeira coluna da Tabela 1

Tabela 1 – Postos hidrológicos estudados

#	Nome	Rio	MLT (m³/s)	Taxa de Variação	Área de Drenagem (km²)
1	Sobradinho	São Francisco	2.667	Estacionária	499.084
2	Ilha Solteira	Paraná	5.322	+10,3%	377.197
3	Mascarenhas	Doce	974	-11,7%	73.487
4	Barra Bonita	Tietê	438	+16,2%	33.156
5	Rosana	Parapanema	1.286	+28,4%	100.799
6	Salto Osório	Iguaçu	1.045	+26,2%	45.769

suem falhas. Sua estimativa é feita através da incorporação de usos consuntivos (irrigação, criação de animais e abastecimentos urbano, rural e industrial) e retirada dos efeitos de evaporação líquida dos reservatórios (BRAGA; ROCHA; GONTIJO, 2009). Os históricos compreendem as datas de 1931 a 2010 para todos os postos, exceto Mascarenhas e Salto Osório, com histórico de 1938 a 2010 e 1940 a 2010, respectivamente.

A última coluna da tabela 1 traz estatísticas da variação da vazão média (MLT) para os períodos anterior e posterior a 1969, retiradas diretamente de DETZEL et al. (2011). Percebem-se situações relativamente distintas, tanto de acréscimos quando de decréscimos, além de uma série considerada estacionária, incluída propositalmente a título de comparação com as demais. Ressalta-se que essas variações servem apenas como indicadores do comportamento médio das vazões antes e depois de 1969; a abordagem usada no presente trabalho independe desses números.

Na figura 1 são exibidos também os histogramas de médias históricas mês a mês, na intenção de caracterizar a sazonalidade das afluições nas regiões compreendidas no estudo. Observa-se que os postos com maior variação na vazão se localizam na região Sul e possuem sazonalidade não muito bem definida (Rosana e Salto Osório). Para as demais séries, os períodos com maiores vazões no verão e menores no inverno são mais evidentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas de permanência medianas anuais

A apresentação dos resultados se inicia com as curvas de permanência medianas anuais para todos os postos hidrológicos, mostradas na figura 2.

A opção foi por traçar as curvas utilizando os dois períodos característicos, anterior e posterior a 1969. Para as comparações, traçou-se também a curva de permanência mediana baseada no histórico completo. O primeiro fato a chamar atenção é a série de Sobradinho, que mostra diferenças relativamente significativas entre os dois períodos nas permanências de 15% a 55%. Lembra-se que esta série foi considerada estacionária em Detzel et al. (2011). No estudo, os autores utilizaram testes sobre médias anuais, fato que pode ter mascarado uma possível não estacionariedade.

O comportamento geral das curvas com séries não estacionárias mostrou-se condizente com a magnitude da variação percentual da MLT apresentada na tabela 1. As séries de Rosana e Salto Osório foram as que apresentaram as maiores discrepâncias nas curvas entre os períodos considerados. Outro fato interessante se refere a Mascarenhas, cuja taxa de variação foi negativa. Diferentemente das outras séries, as curvas de permanência para esse posto se inverteram, sendo que a curva do período posterior a 1969 ficou abaixo da curva do período anterior a esse ano.

Um resultado importante que pode ser inferido dessas curvas são as diferenças observadas nas permanências interdiárias (20% a 50%). Isso sugere que as variações nas afluições

entre os períodos não se limitam aos eventos extremos, podendo significar que há, de fato, uma mudança na característica das vazões destas séries. O que reforça esse argumento é a utilização das curvas anuais medianas, insensíveis aos eventos extremos (VOGEL; FENNESSEY, 1994). Naturalmente, essa conclusão é mais evidente nas séries de Rosana e Salto Osório.

Junto a todas as curvas, plotaram-se também as MLTs referentes às séries históricas dos períodos antes e depois de 1969 em cada posto. A razão para isto foi verificar uma eventual mudança nas permanências associadas a esses valores. Uma redução foi observada em Barra Bonita, nos quais as permanências associadas às MLTs dos respectivos períodos diminuíram de 33,3% para 29,0%. Assim, mesmo tendo uma vazão maior em magnitude no período pós 1969, a permanência associada à sua MLT diminuiu, ou seja, a frequência com que as vazões atingiram o valor médio do período reduziu. Outra redução aconteceu em Sobradinho, no qual as permanências caíram de 37,0% para 33,4%. A diferença é que, neste caso, as vazões médias também diminuíram entre os períodos. Para os demais postos, não foram observadas alterações nesse sentido.

Focando-se na vazão de outorga com permanência de 95%, elaborou-se a tabela 2, que detalha as magnitudes antes e depois de 1969 juntamente com a variação percentual.

Tabela 2 – Vazões de permanência 95% ($Q_{95\%}$ – m³/s)

Nome	Até 1969	Após 1969	Varição
Sobradinho	912	859	-6,2%
Ilha Solteira	2.027	2.287	+11,4%
Mascarenhas	443	343	-29,5%
Barra Bonita	151	179	+15,6%
Rosana	454	653	+30,5%
Salto Osório	249	324	+23,1%

Embora na análise das curvas de permanência da figura 2 as diferenças nas vazões com probabilidade de excedência de 95% não tenham ficado muito evidentes, a tabela 2 mostra variações significativas. Destaca-se a variação positiva de quatro das seis séries, sugerindo que suas $Q_{95\%}$ tenham aumentado no período mais recente. A fim de investigar mais a fundo essa consequência e seus reflexos na outorga, foram traçadas curvas de permanência sazonais, cujos principais resultados são mostrados na próxima seção.

Curvas de permanência sazonais

Curvas de permanência mensais foram traçadas para todos os seis postos, contudo, devido à limitação de espaço, escolheram-se somente algumas para exibição. O critério foi baseado nos resultados apresentados na tabela 2 e nas distribuições de frequências das vazões mensais mostradas na figura 1. A figura 3 traz, num primeiro momento, as curvas para os postos de Ilha Solteira e Salto Osório, nos meses de janeiro e junho.

As diferenças entre as magnitudes das vazões são mais evidentes no posto de Ilha Solteira, que possui uma sazonalidade

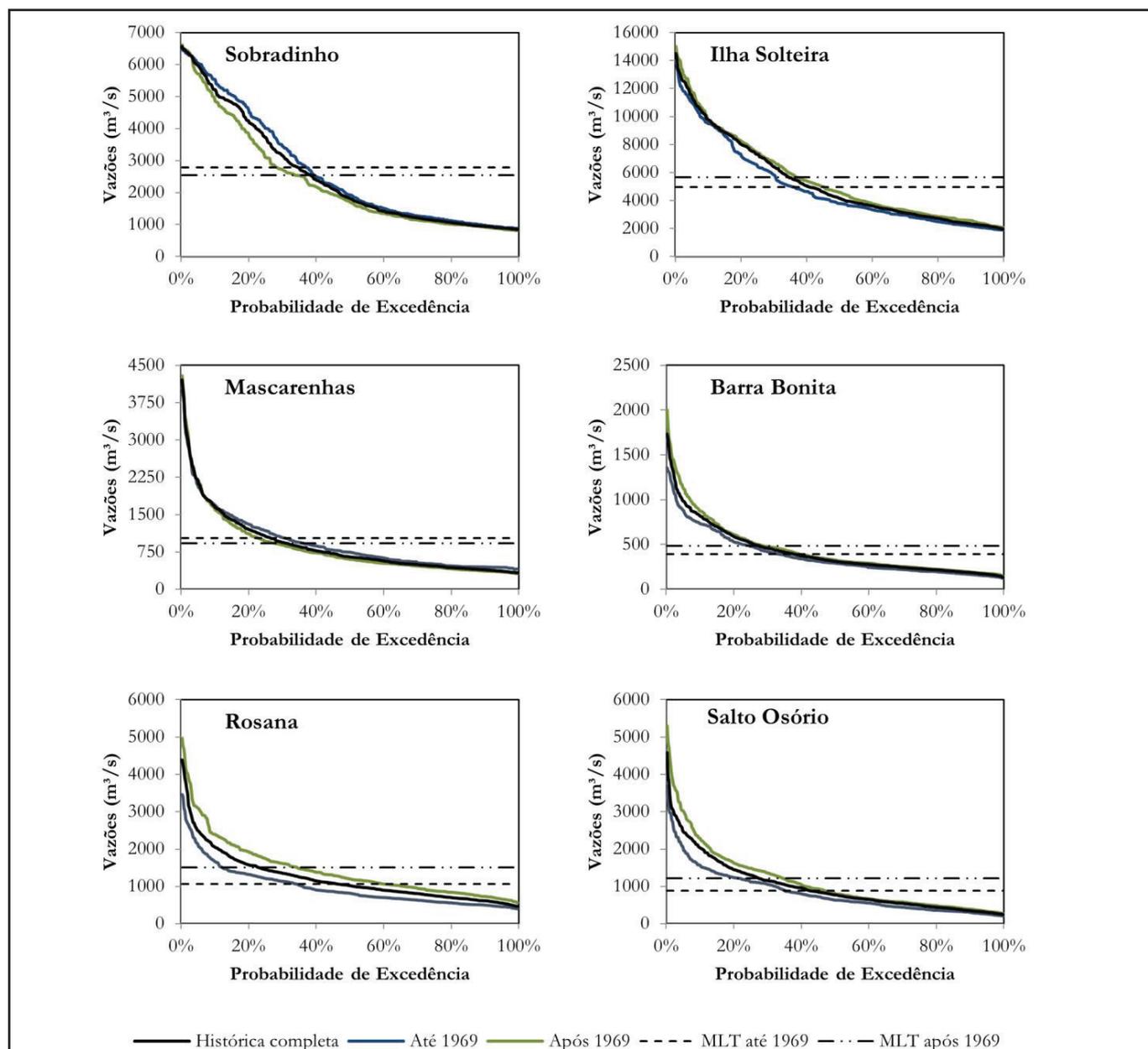


Figura 2 – Curvas de permanência para os períodos anterior e posterior ao ano de 1969

bem definida no ano. Em janeiro, a permanência associada às MLTs dos períodos reduziu 12,5%. Dessa maneira, antes de 1969 a frequência de excedência da vazão era de 50,0% e caiu para 37,5% no período mais recente. Essa é uma constatação semelhante da feita em Barra Bonita para as curvas anuais, pois as vazões em Ilha Solteira aumentaram no período pós 1969.

No entanto as diferenças das permanências para a $Q_{95\%}$ entre os períodos anterior e posterior a 1969 são mais significativas no mês de janeiro em Salto Osório. Enquanto Ilha Solteira apresentou um aumento de 9,4% em janeiro e 13,1% em junho, Salto Osório mostrou aumentos de 35% e 19,7% nesses mesmos meses. À parte da grandeza desses números, nota-se que o maior aumento em Ilha Solteira foi em janeiro, enquanto que em Salto Osório foi em junho. No caso de Ilha Solteira, permite-se concluir que esse acréscimo se deu na estação de maior vazão do posto.

A figura 4 detalha, mês a mês, as diferenças das vazões de permanência 95% para Mascarenhas. A redução dos valores de permanência 95% para esse posto foi observada em todos os meses, sendo mais severa em maio, julho, setembro e outubro. Para esses meses a taxa de variação foi superior a 30% de queda na $Q_{95\%}$ (-40,2%, -31,7%, -37,3% e -32,3%, respectivamente). Ao analisar a distribuição de frequências das vazões médias mensais (Figura 1), percebe-se que os meses de julho, setembro e outubro estão na estação seca do ano, fato que agrava ainda mais essa redução. As menores quedas foram observadas em janeiro e dezembro, com -11,6% e -8,6% respectivamente.

É importante lembrar que os resultados obtidos para as curvas de permanência mensais aqui exibidas devem ser avaliados com ressalvas. Isso decorre do fato de que ao lidar com curvas mensais o número de elementos da série histórica é reduzido. Enquanto que nas curvas medianas anuais conta-se com amostras

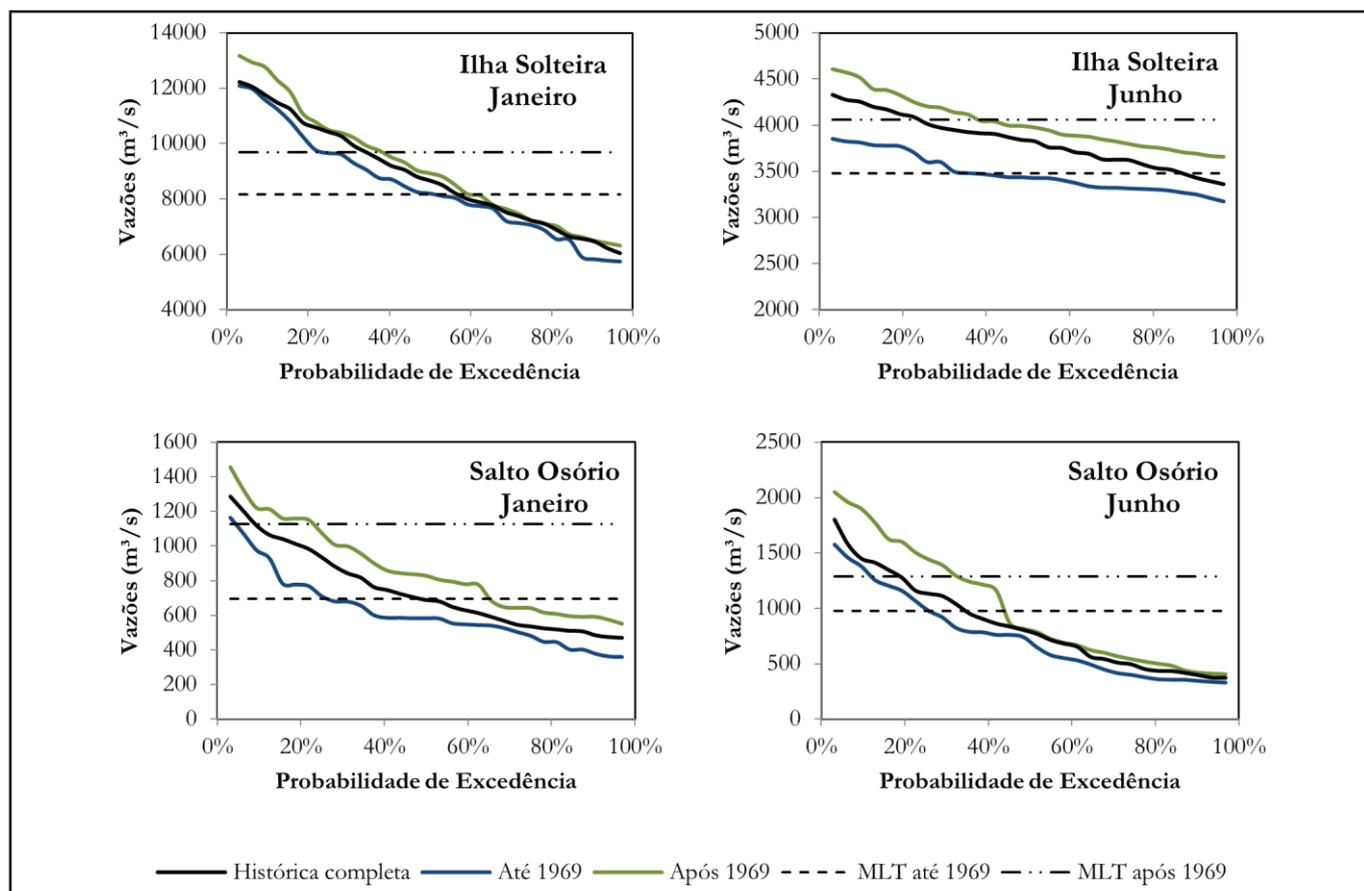


Figura 3 – Curvas de permanência de janeiro e junho para Ilha Solteira e Salto Osório

de 365 elementos, nas curvas mensais essas amostras caem para, no máximo, 31 elementos. Segundo Vogel e Fennessey (1994) amostras de tamanho reduzido podem introduzir tendenciosidade na determinação das curvas de permanência. Como alternativa esses autores propõem a utilização de um estimador baseado na distribuição Beta, consideravelmente mais complexo do que o tradicional estimador de Weibull [equação (2)]. Ainda assim, os resultados apresentados nesta seção permitem confirmar que a não estacionariedade nas séries mensais, se existente, possui grande influência na disponibilidade hídrica quando determinada via curvas de permanência.

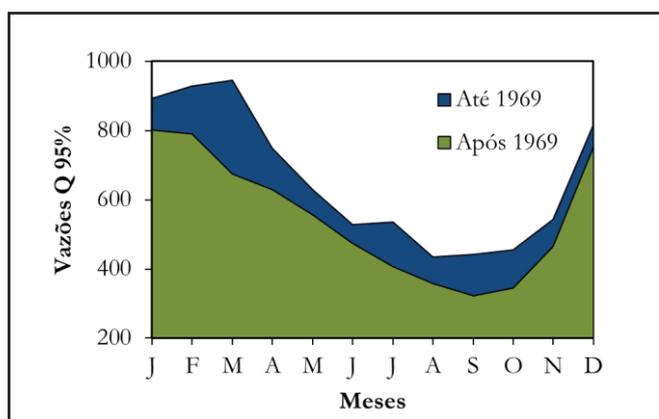


Figura 4 – Variação mensal da vazão $Q_{95\%}$ para Mascarenhas

DEMAIS CONSIDERAÇÕES

Embora as razões da não estacionariedade das séries não tenham sido abordadas neste trabalho, sabe-se que são produtos da extensa alteração no uso do solo, potenciais questões associadas às variabilidades climáticas, e de outras atividades antrópicas nas bacias hidrográficas. Os processos de impermeabilização do solo e de desmatamento de florestas para plantio de culturas alterou a fase terrestre do ciclo hidrológico, repercutindo diretamente no aumento da $Q_{95\%}$ para alguns postos. No entanto, mostrou-se também que dois postos sofreram com quedas na $Q_{95\%}$, entretanto apontar razões para essa redução é uma tarefa complexa no contexto do presente trabalho. As diminuições poderiam estar atreladas a usos consuntivos, no entanto estes foram considerados na reconstituição das vazões naturais utilizadas. Dessa maneira, pode-se questionar se as quedas foram resultado de imprecisões nas atividades de reconstituição de vazões naturais ou são consequências de eventos naturais de variabilidade climática.

Evidentemente a escolha do ano de 1969 como referência para as análises pode ser considerada uma simplificação. Apesar de estar baseado em diversos estudos (GENTA; PEREZ-IRIBARREN; MECHOSO, 1997; MÜLLER; KRÜGER; KAVISKI, 1998; SÁFADI, 2004) é muito provável que as variações nas aflúncias possam ter acontecido em períodos distintos para cada posto. Por outro lado, sabe-se que a existência de um banco de dados hidrológicos consistidos e com histórico tão

longo quanto o utilizado é raro e pode limitar análises como as mostradas no presente trabalho. As séries empregadas, em particular, são produtos de grande esforço por parte do ONS para reconstituição de vazões naturais e validação dos dados (MÜLLER, 2009). Ainda assim, esses dados carregam consigo uma incerteza associada à estimativa dos usos consuntivos, feita com base em fontes diversas. Braga, Rocha e Gontijo (2009) explicam que são consultadas medições de outras variáveis hidrológicas (além da vazão propriamente dita), censos e outros documentos elaborados por diferentes instituições. Os autores mostraram ainda que os picos de consumo desses usos ocorrem em meses de estiagem, o que tem reflexo direto com o assunto tratado no presente trabalho.

Há de se lembrar também que os postos de Sobradinho, Ilha Solteira e Barra Bonita estão instalados em usinas hidrelétricas com reservatórios que têm capacidade de regularizar a vazão afluente. Nesses casos, a presença de um reservatório pode elevar as permanências associadas à $Q_{95\%}$ e, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade hídrica local para outorga. Naturalmente, nas usinas a fio d'água isso não é possível.

Entende-se que nem sempre o interesse é a verificação de disponibilidade hídrica para outorga em locais com as características apresentadas nesse artigo. Ao invés disso, há grande importância em fazer esse tipo de análise em locais que não dispõem de dados suficientes. Cruz (2001) complementa que há grande dificuldade em se obter informações confiáveis para a realização de trabalhos de reconstituição de vazão natural e, conseqüentemente, conseguir devida caracterização do curso de água em análise. Isso obriga os pesquisadores e possíveis interessados em requisitar a outorga de um determinado rio a usar dados de vazão remanescentes (descontados os usos da água antes do posto de medição).

De um modo geral, dados os resultados apresentados, fica evidente de que cuidados devem ser tomados no cálculo da disponibilidade hídrica de um determinado rio quando este se localiza em uma bacia que sofreu (ou sofre) alterações no uso do solo. Recomenda-se veementemente que a verificação da presença de não estacionariedade na série seja feita. Mesmo raciocínio vale quando da avaliação das condições de enquadramento e da cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Apesar de ser um fenômeno de grande escala (espacial e temporal), ele reflete diretamente na disponibilidade hídrica do rio mesmo quando esta é calculada utilizando-se dados diários. Caso a não estacionariedade seja detectada, procedimentos de correção da série podem ser empregados (DETZEL et al., 2011).

CONCLUSÃO

As diversas análises apresentadas neste artigo evidenciaram questões importantes, sendo que as principais delas são elencadas a seguir:

- Sobradinho mostrou diferenças notáveis nas curvas de permanência entre os períodos antes e depois de 1969, mesmo tendo sido considerada série estacionária em Detzel et al. (2011).
- No geral, as escalas de variação das curvas de perma-

nência nos subperíodos foram condizentes com as variações observadas nas MLTs das respectivas séries.

- Observaram-se alterações nas permanências intermediárias (20% a 50%), sendo esse um resultado importante do trabalho.
- Barra Bonita e Sobradinho mostraram alterações das permanências associadas às MLTs dos períodos antes e depois de 1969.
- Especificamente para a $Q_{95\%}$, detectaram-se variações de -29,5% (em Mascarenhas) até +30,5% (em Rosana).
- Alterações importantes também ocorreram nas curvas de permanência sazonais, chegando a um aumento de 35% no mês de janeiro em Salto Osório.
- Grandes reduções nas permanências sazonais em Mascarenhas, chegando a uma taxa de -40,2%. Fortes quedas foram também identificadas nos meses mais secos do ano para esse posto.

Verificações aprofundadas na condição de estacionariedade de séries hidrológicas têm sido realizadas quase que exclusivamente para propósitos de modelagem dessas séries. Contudo, tendo em vista os resultados mostrados nesse trabalho, recomenda-se fortemente que essas análises sejam incorporadas nas atividades de gestão de recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as valiosas críticas, sugestões e demais contribuições feitas pelos revisores anônimos desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAMOWSKI, J.; FUNG CHAN, H.; PRASHER, S. O.; OZGA-ZIELINSKI, B.; SLIUSARIEVA, A. Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada. *Water Resour. Res.*, v. 48, n. 1, W01528, Jan. 2012.
- BEARD, L. R. Statistical analysis in hydrology. *ASCE Transactions*, v. 108, p. 1110-1160, 1943.
- BORMANN, H.; PINTER, N.; ELFERT, S. Hydrological signatures of flood trends on German rivers: Flood frequencies, flood heights and specific stages. *J. Hydrol.*, v. 404, n. 1-2, p. 50-66, June 2011.
- BRAGA, R. S.; ROCHA, V. F.; GONTIJO, E. A. Revisão das séries de vazões naturais nas principais bacias hidrográficas do Sistema Interligado Nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2009.

- BRASIL. *Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Brasília: [s.n.], 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 23 maio 2015.
- CRUZ, J. C. *Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais*. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 13, n. 1, p. 111-124, jan./mar. 2008.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Otimização e simulação comparativa de cenários de outorga. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 10, n. 3, p. 75-91, jul./set. 2005.
- DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. R.; VALLEJOS, C. A. V.; SANTOS, A. B.; THOMSEN, L. S.; MINE, M. R. M.; BLOOT, M. L.; ESTRÓCIO, J. P. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos* v. 16, n. 3, p. 95-111, jul./set. 2011.
- DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M. Generation of daily synthetic precipitation series: analyses and application in La Plata river Basin. *Open Hydrol. J.*, v. 5, n. 1, p. 69-77, 2011.
- DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M.; BESSA, M. R.; BLOOT, M. Cenários sintéticos de vazões para grandes sistemas hídricos através de modelos contemporâneos e amostragem. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 1, p. 17-28, jan./mar. 2014.
- FLEMING, S. W.; WEBER, F. A. Detection of long-term change in hydroelectric reservoir inflows: bridging theory and practice. *J. Hydrol.*, v. 470-471, p. 36-54, Nov. 2012.
- GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *J. Climate*, v. 11, p. 2858-2862, 1997.
- LeBOUTILLIER, D. W.; WAYLEN, P. R. A stochastic model of flow duration curves. *Water Resour. Res.*, v. 29, n. 10, p. 3535-3541, Oct. 1993.
- MÜLLER, I. I. *Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água para o setor hidrelétrico: avaliação das vazões indisponibilizadas por usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas*. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKI, E. Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 3, n. 4, p. 51-71, out./dez. 1998.
- NIU, J.; SIVAKUMAR, B. Scale-dependent synthetic streamflow generation using a continuous wavelet transform. *J. Hydrol.*, v. 496, p. 71-78, July 2013.
- RASMUSSEN, P. F. Multisite precipitation generation using a latent autoregressive mode. *Water Resour. Res.*, v. 49, n. 4, p. 1845-1857, Apr. 2013.
- SÁFADI, T. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de Furnas. *Ciênc. Agrotéc.*, v. 28, n. 1, p. 142-148, jan./fev. 2004.
- SALAS, J. D.; RAJAGOPALAN, B.; SAITO, L.; BROWN, C. Special section on climate change and water resources: climate nonstationarity and water resources management. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, v. 138, n. 5, p. 385-388, Sept. 2012.
- SILVA, A. T.; PORTELA, M. M. Stochastic assessment of reservoir storage-yield relationships in Portugal. *J. Hydrol. Eng.*, v. 18, n. 5, p. 567-575, May 2013.
- TUCCI, C. E. M. Mudanças climáticas e impactos sobre os recursos hídricos no Brasil. *Ciênc. Ambiente*, p. 137-156, 2007.
- TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.) *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, 2003. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 9).
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, v. 120, n. 4, p. 485-504, July/Aug. 1994.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves II: a review of applications in water resources planning. *Water Resour. Bull.*, v. 31, n. 6, p. 1029-1039, Dec. 1995.
- WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 4, p. 21-33, out./dez 2014.

Contribuição dos autores:

Daniel Henrique Marco Detzel: Pesquisas bibliográficas, escolha da área de estudo, coleta de dados, implementação dos métodos, interpretação dos resultados (enfoque estatístico) e fechamento do texto.

Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes: Organização do roteiro de análises, interpretação dos resultados (enfoque de gestão dos recursos hídricos) e fechamento do texto.

Miriam Rita Moro Mine: Seleção das técnicas estatísticas utilizadas, interpretação dos resultados (enfoque estatístico) e fechamento do texto.