

## EFEITOS DA NÃO ESTACIONARIEDADE NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA

*Daniel H. M. Detzel*<sup>1\*</sup>; *Cristóvão V. Scapulatempo Fernandes*<sup>2</sup>; *Miriam Rita Moro Mine*<sup>3</sup>

**Resumo** – Atividades antrópicas nas bacias hidrográficas são responsáveis por causar mudanças no uso do solo, de modo a causar 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. 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 disponibilidade hídrica em quatro postos e redução nos outros dois.

**Palavras-Chave** – estacionariedade estatística, curva de permanência, disponibilidade hídrica

## EFFECTS ON NON-STATIONARITY IN WATER AVAILABILITY FOR USE GRANTING

**Abstract** – Anthropogenic activities in watersheds are responsible for causing changes in land use, reflecting in the rivers inflows. Among the consequences is the change on the first hydrological series statistical moments, condition known as non-stationary. The use of a non-stationary series can resonate on relevant errors and biased conclusions in the several analysis. Thus, this paper evaluates the possible effects of this condition on water availability for granting use in six Brazilian hydrometric stations. Median annual and seasonal flow duration curves were used, determined for before and after the year 1969 for each time series. Results suggest increased water availability in four gauging stations and a reduction in the other two.

**Keywords** – statistical stationarity, flow duration curve, water availability

## 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 no planejamento e gestão de sistemas hídricos.

---

<sup>1</sup> Pesquisador no LACTEC. BR-116, Km 98, Nº 8813 – Centro Politécnico da UFPR, 81531-980 Curitiba. E-mail: [daniel@lactec.org.br](mailto:daniel@lactec.org.br)

<sup>2</sup> Professor Associado da UFPR, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba. E-mail: [cris.dhs@ufpr.br](mailto:cris.dhs@ufpr.br)

<sup>3</sup> Professora Associada da UFPR, Centro Politécnico, Jardim das Américas, Curitiba. E-mail: [mrmine.dhs@ufpr.br](mailto:mrmine.dhs@ufpr.br)

\* Autor Correspondente

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.

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 do gerenciamento dos recursos hídricos. A outorga é um dos cinco instrumentos de gestão previstos na Lei 9433/97 (Brasil, 1997), documento que regulamenta a gestão dos recursos hídricos em nosso país. Notadamente complexa por relevar 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.

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 determinação da curva de permanência pode ser feita, basicamente, de duas formas: (i) ajustando-se distribuições probabilísticas ou (ii) empiricamente, sendo esta segunda forma a escolhida no presente trabalho. 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  $q_1$  e  $q_n$  sejam a maior e a menor vazão observada, respectivamente. A probabilidade de excedência de cada observação é representada pela equação (1):

$$p = 1 - F_Q(q) \quad (1)$$

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 e Fennessey, 1994).

$$p_i = i/(n + 1) \quad (2)$$

No presente trabalho, a influência da não estacionariedade na disponibilidade hídrica foi 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, utilizam-se considerações de Cruz e Tucci (2005) para obter curvas de permanência sazonais, com base nos meses do ano. Adota-se como critério de análise a vazão de permanência de 95% para outorga (Müller, 2009).

## ÁREA 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.

Tabela 1 – Postos hidrológicos estudados

#	Nome	Rio	MLT (m <sup>3</sup> /s)	Variação
1	Sobradinho	São Francisco	2.667	E
2	Ilha Solteira	Paraná	5.322	+10,3%
3	Mascarenhas	Doce	974	-11,7%
4	Barra Bonita	Tietê	438	+16,2%
5	Rosana	Paranapanema	1.286	+28,4%
6	Salto Osório	Iguaçu	1.045	+26,2%

\*MLT – Média de Longo Termo; E – Série Estacionaria.

\*\* A última coluna se refere à variação da MLT para antes e depois de 1969 (Detzel *et al.*, 2011)

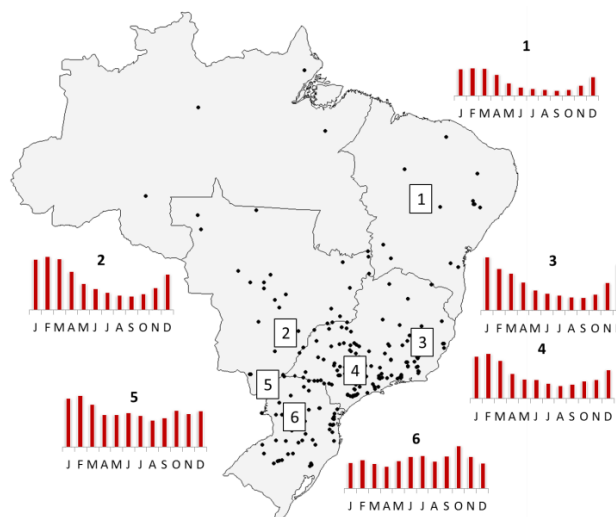


Figura 1 – Localização dos postos hidrológicos estudados e histogramas de MLT mensais

As séries históricas se referem a vazões naturais em escala diária, coletadas diretamente do banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS – [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)). Cabe lembrar que essas vazões são consistidas e não possuem falhas. 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.

Na Figura 1 são exibidos também os histogramas de médias históricas mês a mês, na intenção de caracterizar as regiões hidrológicas 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 chuvosos de verão e secos de inverno são mais evidentes.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Curvas de permanência medianas anuais

A apresentação dos resultados se inicia com as curvas de permanência medianas anuais para os postos de Sobradinho, Rosana, Mascarenhas e Barra Bonita, 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.

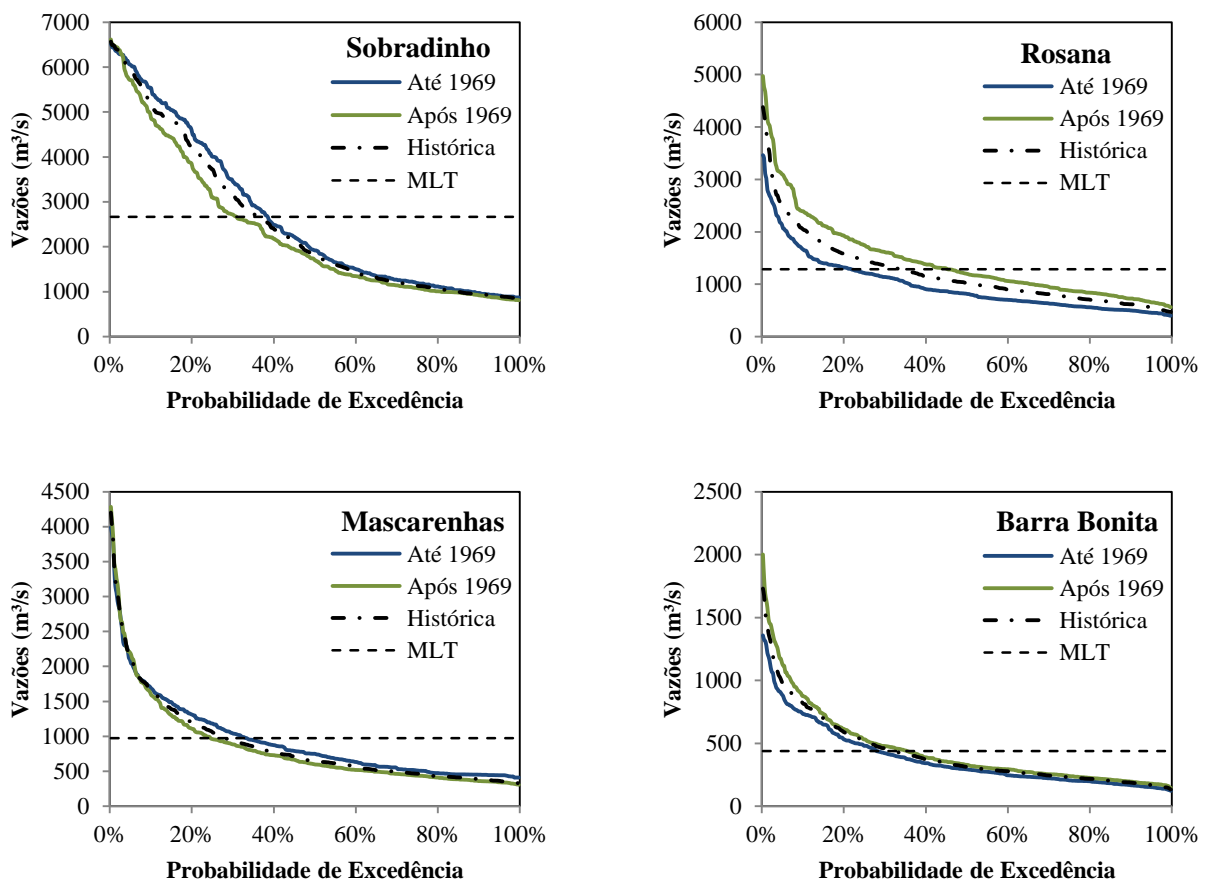


Figura 2 – Curvas de permanência para os períodos anterior e posterior ao ano de 1969

O comportamento geral das curvas com séries não estacionárias mostrou-se condizente com a magnitude da variação percentual da MLT apresentada na Tabela 1. A série de Rosana e Salto Osório (não mostrado) 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 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 intermediárias (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 e Fennessey, 1994).

Junto a todas as curvas, plotou-se também a MLT referente à série histórica completa de cada posto. A razão para isto foi evidenciar que a permanência associada a esse valor mudou de um período para outro em todas as séries. No caso de Rosana, por exemplo, a MLT equivalia a uma vazão diária de permanência de aproximadamente 20% até 1969; no período mais recente, esse valor subiu para 44%. Em outras palavras, a probabilidade da vazão diária atingir ou superar a MLT subiu aproximados 24%. Para Mascarenhas ocorreu o oposto, registrando-se uma redução de 4%.

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% ( $Q_{95\%} - m^3/s$ )

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 disponibilidades hídricas 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.

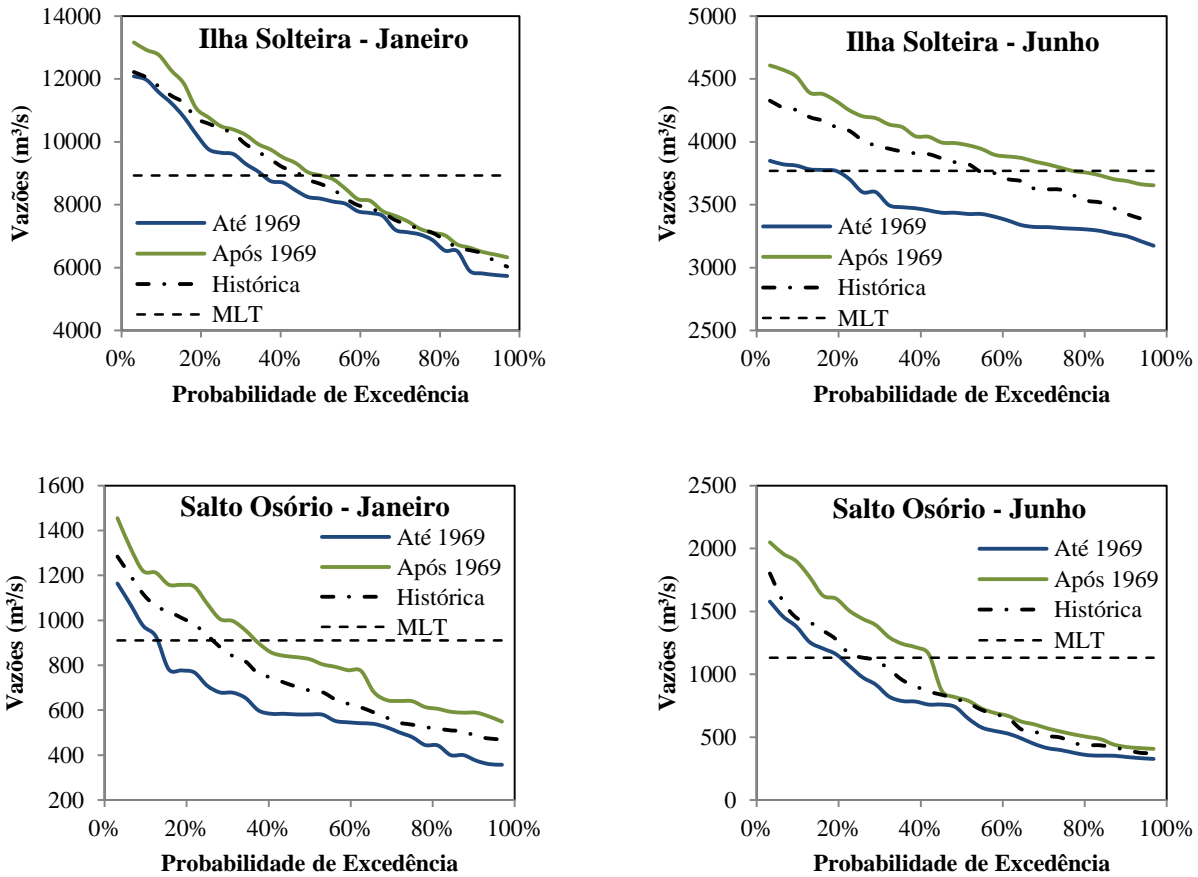


Figura 3 – Curvas de permanência de Janeiro e Junho para Ilha Solteira e Salto Osório

As diferenças entre as magnitudes das vazões são mais evidentes no posto de Ilha Solteira, que possui uma sazonalidade bem definida no ano. No entanto as diferenças das permanências entre os períodos anterior e posterior a 1969 são mais significativas em Salto Osório. Para a  $Q_{95\%}$  Ilha Solteira apresentou um aumento de 9,4% em janeiro e 13,1% em junho; para Salto Osório, os aumentos foram 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 chuvosa do posto.

Em todos os casos, as alterações diferenciais entre os meses foram significativas a ponto de se detalhar o mais crítico, referente a Mascarenhas. Sua importância é devida ao grau de redução da disponibilidade hídrica observada entre os períodos. A Figura 4 mostra, mês a mês, as diferenças das vazões de permanência 95% para este posto. A redução da disponibilidade hídrica foi observada em todos os meses, sendo mais severa em março, 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 na disponibilidade hídrica. As menores quedas foram observadas em janeiro e dezembro, com -11,6% e -8,6% respectivamente.

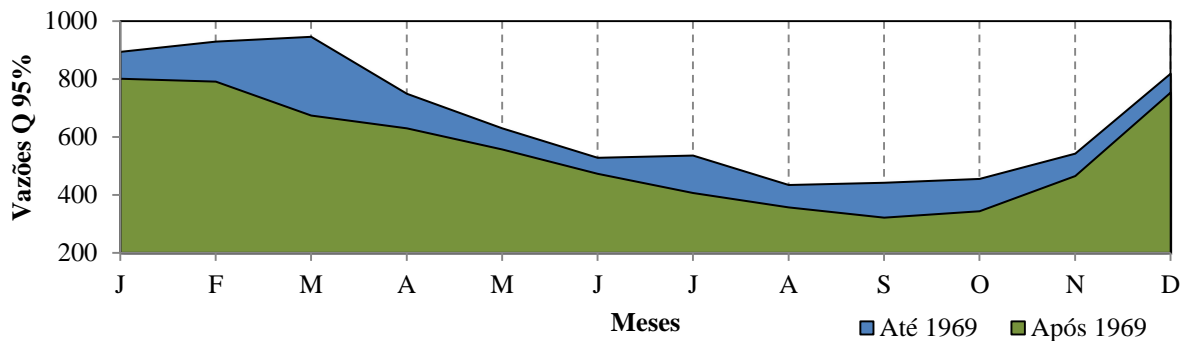


Figura 4 – Variação mensal da vazão  $Q_{95\%}$  para Mascarenhas

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 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)).

### 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 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 disponibilidade hídrica para alguns postos. No entanto, mostrou-se também que dois postos sofreram com quedas na disponibilidade, podendo estar atreladas diretamente ao crescimento dos usos consuntivos nesses rios. Do ponto de vista da outorga e gestão dos recursos hídricos, essa é uma constatação importante, podendo inclusive reforçar a necessidade da cobrança pelo uso do recurso (instrumento da Lei 9433/97). Ao mesmo tempo em que a disponibilidade hídrica se reduz, a demanda pelos recursos hídricos aumenta.

Evidentemente a escolha do ano de 1969 como referência para as análises pode ser considerada uma simplificação. Apesar de estar calcado em diversos estudos (Genta *et al.*, 1997; Müller *et al.*, 1998; Sáfiadi, 2004) é muito provável que as variações nas afluências 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). Como aponta Cruz (2001), há grande dificuldade em se obter dados 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).

## CONCLUSÕES

A intenção do presente trabalho foi justamente avaliar os reflexos da não estacionariedade na determinação da disponibilidade hídrica para outorga, questão de primordial importância no contexto da gestão dos recursos hídricos. Os resultados mostraram duas situações distintas: (i) séries que sofreram acréscimos nos volumes afluentes, consequências da impermeabilização dos solos e (ii) séries que apresentaram redução na vazão, decorrência dos intensos usos consuntivos. O segundo caso é visto como mais crítico, pois repercute na redução da disponibilidade hídrica. No entanto não se pode tirar conclusões definitivas em relação à outorga, porque não foi contemplada a questão da demanda pelos recursos hídricos. Sugere-se esse tópico como tema para estudos futuros.

No decorrer do trabalho ficou claro também que a verificação da não estacionariedade baseada exclusivamente em testes estatísticos sobre médias anuais (como feito em Detzel *et al.*, 2011), pode mascarar essa condição em certas ocasiões. Mostrou-se que a série de Sobradinho teve uma alteração relevante nas curvas de permanência entre os períodos de tempo considerados, mesmo sendo considerada uma série estatisticamente estacionária. Com isso, sugere-se que a verificação da não estacionariedade seja feita de modo criterioso, principalmente quando a série for empregada em análises importantes como a outorga de uso dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL, Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.
- CRUZ, J. C. (2001) Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Tese (doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 189f.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. (2005). Otimização e simulação comparativa de cenários de outorga. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(3), pp. 75 – 91.
- 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. (2011). Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(3), pp. 95 – 111.
- GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G; MECHOSO, C. R. (1997). A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America. *Journal of Climate*, 11, pp. 2858 – 2862.
- MÜLLER, I. I. (2009). Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água para o setor hidrelétrico: avaliação das vazões indisponibilizadas por usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas. Tese (doutorado), Setor de ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná, 180 f.
- MÜLLER, I. I. KRÜGER, C. M.; KAVISKI, E. (1998). Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(4), pp. 51 – 71.
- SÁFADI, T. (2004). Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de Furnas. *Ciências Agrotécnicas*, 28(1), pp. 142-148.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. (1994). Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), pp. 485 – 512.