

Análise do Efeito da Operação das Barragens do Sistema Cantareira no Regime Hidrológico do Rio Piracicaba

**Juliano Daniel Groppo, Angelo C. Stenico, Luiz Felipe Salemi,
Carlos Eduardo Beduschi, Rodrigo Trevisan**

Laboratório de Ecologia Isotópica CENA-USP

jgroppo@cena.usp.br; acstenico@yahoo.com.br; felippe@esalq.usp.br; beduschi@cena.usp.br; rtrevisan@cena.usp.br

Jorge Marcos de Moraes

Escola de Engenharia de Piracicaba, EEP-FUMEP

jmmoraes@cena.usp.br;

Recebido: 09/05/07 – revisado: 13/08/08 – aceito: 07/03/09

RESUMO

A bacia do rio Piracicaba, a partir da década de 70, passou a ser pólo de atividades poluidoras e consumidoras dos recursos hídricos. Esse quadro foi agravado pela reversão de 31 m³/s de água pelo Sistema Cantareira para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). No intuito de apresentar informações úteis aos órgãos de gestão dos recursos hídricos, o objetivo principal desse trabalho foi o de estudar o comportamento dos valores extremos (vazões máximas e mínimas) de alguns rios dessa bacia e avaliar qual a influência da operação das barragens, que constituem o Sistema Cantareira, nesses parâmetros. Os resultados mostram uma diminuição sensível das vazões máximas e mínimas nos rios Jaguari e Atibaia após o início das operações. Já no rio Piracicaba, mais distante das barragens, houve um aumento nas vazões máximas e diminuição das vazões mínimas.

Palavras-chave: análise de tendência; mudanças bruscas; séries temporais; vazões máximas; vazões mínimas; hidrologia.

INTRODUÇÃO

A água é uma fonte essencial para a sobrevivência humana e das demais espécies, porém o aumento do seu consumo e da carga de efluentes lançada aos cursos d'água, vem causando graves alterações tanto na qualidade como na quantidade desse recurso.

A bacia do rio Piracicaba, localizada numa região importante economicamente para o Estado de São Paulo, tanto no ramo industrial como no agrícola, é um exemplo típico dessa situação preocupante. Além de possuir um crescimento populacional e industrial maior que a média do país, o comportamento hidrológico dos principais rios dessa bacia foi profundamente modificado a partir da implantação do Sistema Cantareira pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), responsável pela reversão inter-bacias de 31 m³/s para abastecer a Região Metropolitana de São Paulo (Moraes et al., 1995; Moraes et al. 1997; Groppo et al., 2001).

A construção do Sistema Cantareira teve início em 1965 e foi implantado em duas etapas: a primeira compreendeu o aproveitamento dos rios Juqueri, Atibainha e Cachoeira, com início de operações em 1975, fornecendo a vazão nominal de 11 m³/s para São Paulo. Em 1976 tiveram início às obras relativas à segunda etapa, com inicio de operação em 1981, compreendendo as barragens dos rios Jaguari e Jacareí, e que propiciaram a adução de 33 m³/s, dos quais 31 m³/s provem da bacia do rio Piracicaba e 2 m³/s da bacia do Rio Juqueri (DAEE, 1988; SÃO PAULO, 1990). A população atendida pelo sistema integrado saltou de 60% da população presente em 1975 para 95% em 1984 (SABESP, 1990).

Objetivando uma melhor gestão dos recursos hídricos, inúmeros trabalhos acadêmicos e científicos vêm sendo realizados nessa bacia (Prochnow, 1981; Krusche et al., 1997; Groppo et al. 2001 e 2006; Martinelli, 1999; Moraes et al., 1995, 1997; Pellegrino et al., 2001, entre outros). Tendo em vista a ausência de estudos aprofundados sobre o comportamento das vazões máximas e mínimas dos rios da bacia, o objetivo do presente foi estudar as variáveis estatísticas da vazão na bacia do rio Piracicaba antes e

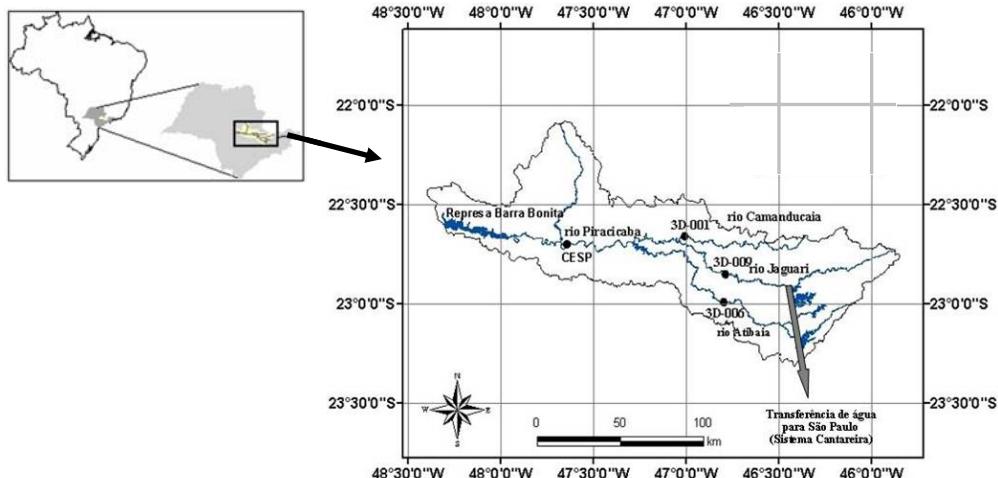


Figura 1 - Bacia do rio Piracicaba com a localização dos postos fluviométricos utilizados no estudo.

depois do inicio da operação das barragens do Sistema Cantareira, tendo como foco, a análise de tendência, a verificação das mudanças de freqüência de distribuição na vazão, e ocorrência de valores extremos (vazões máximas e mínimas), no rio Piracicaba e nos seus principais formadores Atibaia e Jaguari sob a influência do Sistema Cantareira, e no rio Camanducaia sem a influência do Sistema. A tomada desse último rio como referência apresenta também a vantagem do mesmo apresentar um regime de chuvas similar ao do rio Jaguari.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados das séries históricas de vazão

A localização da bacia do rio Piracicaba, seus principais rios e os postos fluviométricos utilizados são mostrados na figura 1. Os dados dos postos dos rios Atibaia (3D-006, latitude 22°58' S e longitude 46°49' W), Jaguari (3D-009, latitude 22°51' S e longitude 46°46' W) e Camanducaia (3D-001, latitude 22°40' S e longitude 46°58' W) foram obtidos do DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica).

O posto do rio Piracicaba (CESP, latitude 22°41' S e longitude 47°40' W) na cidade do mesmo nome foi obtido da CESP (Companhia Energética de São Paulo). Esses postos foram selecionados por possuírem séries históricas de boa qualidade no período estudado (1947 a 1996).

A série temporal de valores mínimos foi obtida através das séries de dados diários, sendo escolhido o menor valor médio de sete dias consecutivos para cada ano. A série temporal de valores máximos foi constituída pelo maior valor diário de vazão para cada ano.

Análise de tendência dos dados de vazão

Realizou-se uma análise estatística exploratória com os dados de vazão máxima e mínima com o objetivo de verificar possíveis tendências ou mudanças bruscas nas médias. Através dessa análise é possível detectar-se possíveis alterações, devido a efeitos naturais ou antrópicos, nos parâmetros do ciclo hidrológico.

As séries temporais foram inicialmente analisadas visualmente, através da curva da vazão normalizada (valor-média/desvio padrão) e a média móvel de 5 anos e posteriormente foram aplicados o teste seqüencial de Mann-Kendall (Sneyers, 1975) e o teste de Pettitt (Pettitt, 1979).

O teste seqüencial de Mann-Kendall, segundo Sneyers (1975), é um teste estatístico não paramétrico, no qual, na hipótese da estabilidade de uma série temporal, os valores devem ser independentes e a distribuição de probabilidades deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples).

Considerando uma dada série temporal Y_i de N termos ($1 \leq i \leq N$) a ser analisada, este teste consiste na soma $t_n = \sum_{i=1}^N m_i$ do número de termos m_i da série, relativo ao valor Y_i , cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($Y_j < Y_i$). Para N grande, sob

hipótese nula H_0 de ausência de tendência, t_n apresentará uma distribuição normal com média e variância: $E(t_n) = N(N-1)/N$ e $Var(t_n) = N(N-1)(2N+5)/72$.

Testando a significância estatística de t_n para a hipótese nula usando um teste bilateral, esta pode ser rejeitada para grandes valores da estatística $u(t_n)$ através de:

$$u(t_n) = (t_n - E(t_n)) / (var(t_n))^{1/2} \quad (1)$$

O valor da probabilidade α_1 é calculado por meio de uma tabela da normal reduzida, tal que: $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(t_n)|)$. Sendo α_0 o nível de significância do teste ($\alpha_0 = 0,05$ e $0,1$ para significante e levemente significante respectivamente), a hipótese nula é aceita se $\alpha_1 > \alpha_0$. Caso a hipótese nula seja rejeitada, significará a existência de tendência significativa, sendo que o sinal da estatística $u(t_n)$ indica se a tendência é positiva ($u(t_n) > 0$) ou negativa ($u(t_n) < 0$).

Em sua versão seqüencial, a equação (1), é calculada no sentido direto da série, partindo do valor de $i=1$ até $i=N$, gerando a estatística $u(t_n)$ e no sentido inverso da série, partindo do valor de $i=N$ até $i=1$, gerando a estatística $u^*(t_n)$. A intersecção das duas curvas geradas, representa o ponto aproximado de mudança de tendência, se este ocorre dentro do intervalo de confiança $1,96 < u(t_n) < 1,96$ ($1,96$ correspondendo $\alpha_0 = 0,05$).

Nesse teste, uma tendência é constatada quando a curva $u(t_n)$, que é o teste aplicado no sentido direto da série temporal, cruza o limites de confiança de 90% e 95%. O teste aplicado no sentido inverso da série, representado pela linha $u^*(t_n)$, serve também para detectar uma ruptura na série, quando esta cruza a linha $u(t_n)$, dentro do intervalo de confiança (Gossens & Berger, 1986).

O teste de Pettitt (1979), é também um teste não paramétrico, que utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney, no qual se verifica se duas amostras Y_1, \dots, Y_t e Y_{t+1}, \dots, Y_T são da mesma população. A estatística $U_{t,T}$ faz uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que um membro da segunda, e pode ser escrita:

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^T \text{sgn}(Y_t - Y_j) \quad (2)$$

para $t = 2, \dots, T$
onde: $\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$; $\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$; $\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

A estatística $U_{t,T}$ é então calculada para os valores de $1 \leq t \leq T$, e a estatística $k(t)$ do teste de Pettitt é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$. Esta estatística localiza o ponto onde houve uma ruptura ("changing point") de uma série temporal, e a sua significância pode ser calculada aproximadamente pela equação :

$$p \cong 2 \exp \left\{ -6k(t)^2 / (T^3 + T^2) \right\} \quad (3)$$

Os métodos descritos por Sneyers (1975) e Pettitt (1979), deram origem a um programa em linguagem FORTRAN que foi desenvolvido por Moraes *et al.* (1995) e vem sendo utilizado com sucesso na detecção de mudanças bruscas nas médias e tendências em séries temporais de vazão e precipitação (Moraes *et al.* 1998; Groppo *et al.* 2001 e 2006; Pellegrino *et al.*, 2001).

Antes da aplicação desses testes, realizou-se a verificação da independência das séries temporais através do teste de autocorrelação serial, já que sem essa premissa tendências inexistentes podem ser detectadas (Clarke & Brusa, 1997; Marengo & Tomasella; 1996). Para tal finalidade foi utilizado o programa Minitab ("Minitab Statistical Software").

Estudo das Distribuições de Probabilidades

Existem várias técnicas matemáticas e estatísticas que permitem analisar os dados hidrológicos. Em linhas gerais essas técnicas são utilizadas buscando identificar relações empíricas ou conceituais do comportamento hidrológico, visando uma melhor compreensão do seu funcionamento e a previsão de cenários futuros. O objetivo da análise de freqüência ou de probabilidades é obter a relação entre a variável estudada e a probabilidade de ocorrerem valores maiores ou iguais quando se examinam os extremos. As distribuições de extremos são de grande interesse prático em hidrologia, já que freqüentemente ajustam adequadamente a valores de máximos e mínimos que ocorrem nas variáveis hidrológicas (Chow *et al.*, 1988; Lanna, 2001).

Segundo Chow *et al.* (1988) os valores extremos não seguem uma distribuição normal e geralmente convergem para distribuições assintóticas de valores extremos chamadas de tipo I, II e III, conhecidas como de Gumbel, Flechet e de Weibull, respectivamente.

Nesse estudo foram aplicadas às distribuições assintótica dos extremos do tipo I (Gumbel) e assintótica dos extremos do tipo III (Weibull), para vazões mínimas com período de retorno de 10 anos,

e a distribuição Assintótica dos extremos do Tipo I para séries de máximos (Gumbel), para vazões máximas com diferentes períodos de retorno de 2, 5, 10 e 15 anos. Essas distribuições tem sido utilizadas em diversos estudos hidrológicos (Chow et al., 1988; Waylen & Caviedes, 1990; Lanna, 2001; DAEE, 1988; Silveira e Silveira, 2001).

As distribuições assintóticas dos tipos I, II e III, conforme demonstrado por Jenkinson (1955), são casos especiais da distribuição generalizada de valores extremos (GEV). Essa distribuição de probabilidades pode ser escrita como:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - k \frac{x - \mu}{\alpha} \right)^{1/k} \right] \quad (4)$$

onde: x = evento analisado; μ = é a moda da distribuição; α e k = são parâmetros da distribuição, sendo que α é dado pela equação $\alpha = 0,78 \sigma_{x-1}$, e k apresentando três condições:

1. $k = 0$, neste caso, diz-se que a distribuição é do tipo I ou de Gumbel e pode ser aplicada para $-\infty < x < \infty$;
2. $k < 0$, caso em que se diz que a distribuição é do tipo II ou de Frechet e pode ser aplicada na condição de $(\mu + \alpha/k) \leq x < \infty$;
3. $k > 0$, diz-se que a distribuição é do tipo III ou de Weibull e pode ser aplicada para $-\infty < x \leq (\mu + \alpha/k)$; nos três casos, α tem que ser positivo.

Enquanto a moda é dada por:

$$\mu = x_m - 0,577\alpha \quad (5)$$

onde: x_m = média dos eventos que compõem a série; σ_{x-1} = desvio padrão da média.

O ajuste de uma distribuição teórica a uma distribuição empírica de probabilidades é, na sua essência, a determinação dos valores adequados dos parâmetros de forma que a primeira se torne a mais idêntica possível à segunda (Lanna, 2001). A estimativa dos parâmetros das distribuições tem sido tema de discussões, uma vez que existem diversos métodos para a sua determinação. Smith (1985) sugere a utilização de métodos baseados em verossimilhança devido à teoria dos estimadores ser mais utilizada e

entendida. Entretanto, Hosking et al. (1985) e Martins & Stendinger (2000) revelaram a possibilidade de problemas de convergência no processo iterativo de Newton-Raphson, comumente utilizado nas estimativas de máxima verossimilhança. Hosking et al. (1985) mostraram que os estimadores dos parâmetros obtidos através do método dos momentos, eram preferíveis em comparação aos obtidos através do método da máxima verossimilhança, para amostras entre 15 e 100 dados.

No presente trabalho a estimativa dos parâmetros foi realizada pelo método dos momentos como apresentado por Lanna (2001) e Shifley e Lentz (1985), pois além das vantagens apresentadas pelos autores citados anteriormente, apresenta a praticidade de ser realizada em planilhas Excel, sem a utilização de programas estatísticos mais complexos.

A determinação dos valores das vazões mínimas de sete dias com tempo de retorno de dez anos e máximas para os diversos tempos de retorno foram realizadas através do ajuste de distribuição de probabilidades teórico e a freqüência de ocorrência de eventos observados para cada série histórica anual. A qualidade dos ajustes foi verificada através do teste de Kolmogorov-Smirnov e do coeficiente de determinação (R^2), ambos usando o programa estatístico SPLUS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização sucinta da precipitação na área de estudo

A caracterização da precipitação faz-se aqui necessário para orientar as discussões sobre as tendências das vazões máximas e mínimas, uma vez que a mesma é um importante parâmetro de entrada do ciclo hidrológico. Esses estudos já foram realizados na bacia do Piracicaba por Pellegrino (1995), Moraes et al. (1998) e Groppo et al. (2001 e 2006), através da análise de séries temporais, apresentaram tendências positivas estatisticamente significativas na precipitação em praticamente toda bacia do Piracicaba no período 1947 a 1997. Já Moraes et al. (1998), utilizando um período maior de dados (1930-1995), constataram um aumento da contribuição pluviométrica, mesmo que estatisticamente não significativo e que acarreta um aumento em torno de 100 milímetros na precipitação da bacia depois de 1980.

Análise exploratória dos dados de vazões máximas e mínimas de 7 dias

As figuras 2 (a) e 2 (b) mostram os exemplos da análise visual das vazões mínimas de 7 dias normalizadas (valor-média/desvio padrão) e a média móvel de 5 anos para o rio Atibaia (3D-006), sob o efeito dos sistema de barragens e para o rio Camanducaia (3D-001), sem a influência do mesmo. O valor de vazão mínima de 1983, quando houve eventos de enchentes mesmo na estação seca, foi excluído de todas as análises por tratar-se de um evento atípico. Pode-se observar que os valores de vazão mínima da estação sob o efeito das barragens (3D-006) apresenta vazões mínimas abaixo da média a partir do início dos anos 70, o que não ocorre com a estação sem a referida intervenção.

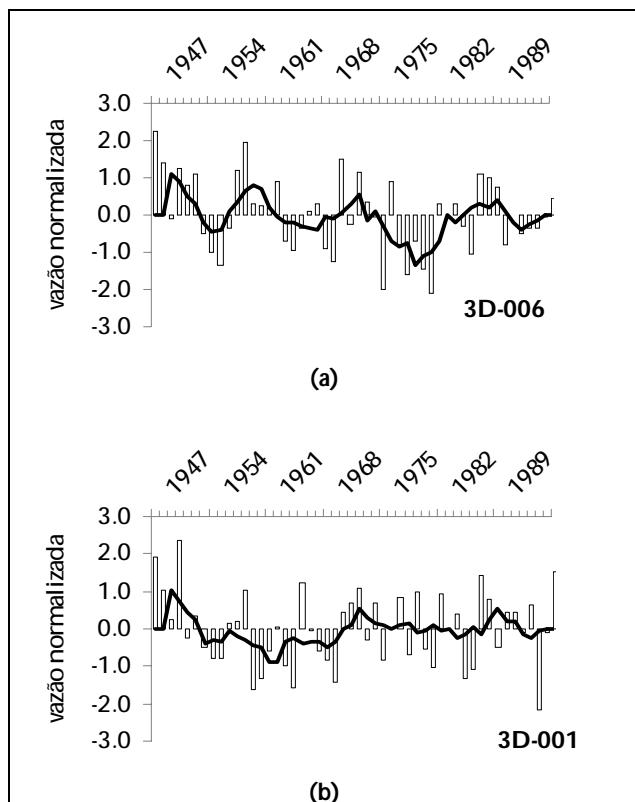


Figura 2 - Vazões normalizadas das vazões dos rios:
(a)Atibaia e (b)Camanducaia.

A curva da função de autocorrelação (ACF) das séries temporais, utilizada para os testes de independência, foram aplicadas em todas as séries analisadas como no exemplo apresentado na figura 3, para a vazão mínima de 7 dias do rio Atibaia. Em todos os casos, nas séries de máximas e mínimas,

não houve correlação serial significativa, respeitando assim a premissa básica para a aplicação dos testes estatísticos.

A forma gráfica no teste de Mann-Kendall pode ser ilustrada através da análise das vazões máximas e mínimas dos rios Jaguari e Camanducaia nas figuras 4 e 5, respectivamente. Nessas figuras os limites de confiança de 90% (levemente significativo) são representados pelas linhas pontilhadas e os limites de confiança de 95% (significativo) são representados pelas linhas contínuas. Quando a curva da estatística $u(t)$, representada pela linha espessa ultrapassa essas duas linhas, significa que existe uma tendência significativa. Esse teste pode (b) apontar mudanças bruscas da série temporal, quando há cruzamento das curvas das estatísticas $u(t)$ e a sua inversa $u^*(t)$ como observado por Gossens & Berger (1986). Por outro lado, se houver várias interseções no período estudado torna-se difícil a localização de uma mudança brusca. Devido a este fato é utilizado também o teste de Pettitt que possui uma sensibilidade maior para análise de mudanças bruscas na média.

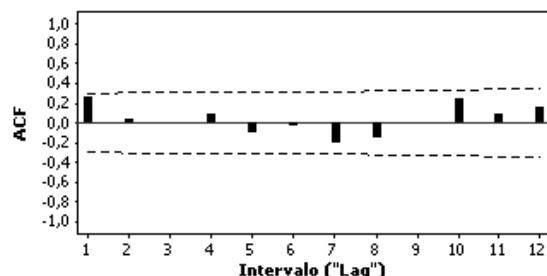


Figura 3 - Correlograma da vazão mínima de 7 dias do rio Atibaia (3D-006). A linha pontilhada mostra os limites de confiança a 95%.

No caso da figura 4a, pode-se observar que existe uma diminuição das vazões máximas do rio Jaguari, oscilando entre levemente significativa e significativa a partir de 1978, e tornando-se significativa a partir de 1992. O mesmo não ocorre no rio Camanducaia (figura 4b), onde existe uma tendência positiva das vazões máximas, no mesmo período de estudo, que se torna significativa a partir de 1988. Já nas figuras 5a e 5b são analisadas as vazões mínimas de 7 dias para os mesmos rios, sendo que para o rio Jaguari (fig. 5a) pode-se observar uma tendência negativa que se torna significativa em torno de 1991 e para o rio Camanducaia (fig. 5b) a tendência é positiva, mesmo que estatisticamente não significativa. Os aspectos que determinam essas tendências serão discutidos abaixo.

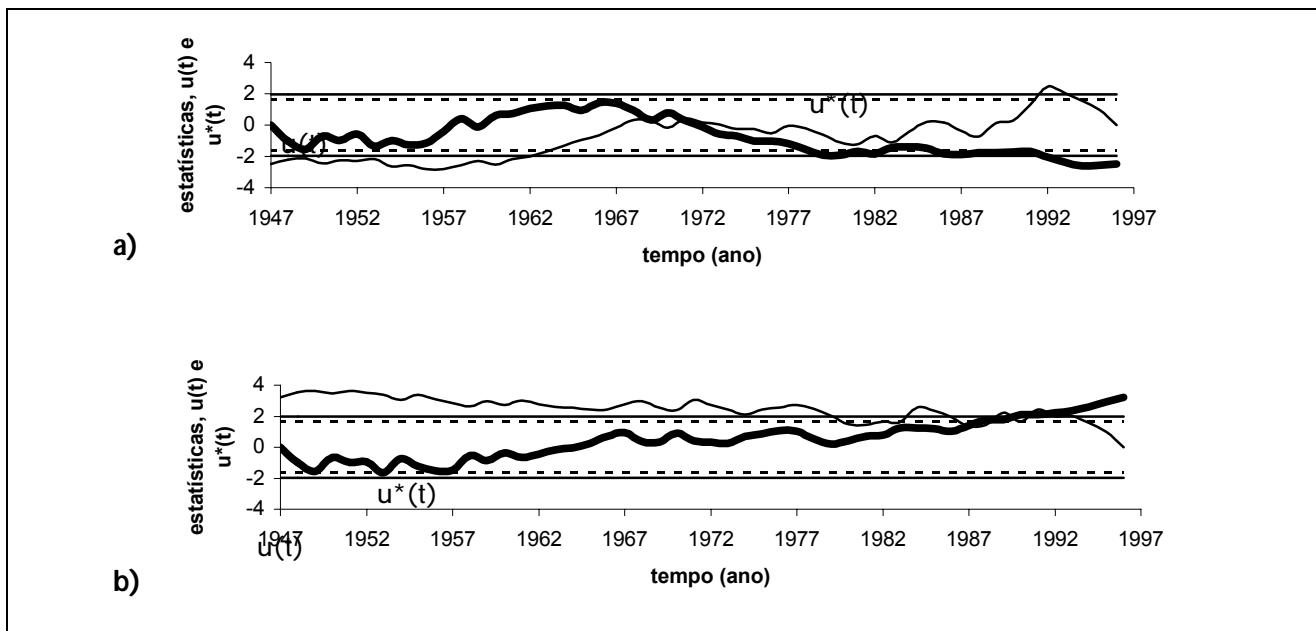


Figura 4 - Teste de Mann-Kendall das vazões máximas: (a) do rio Jaguari no posto 3D-009 e (b) do rio Camanducaia no posto 3D-001.

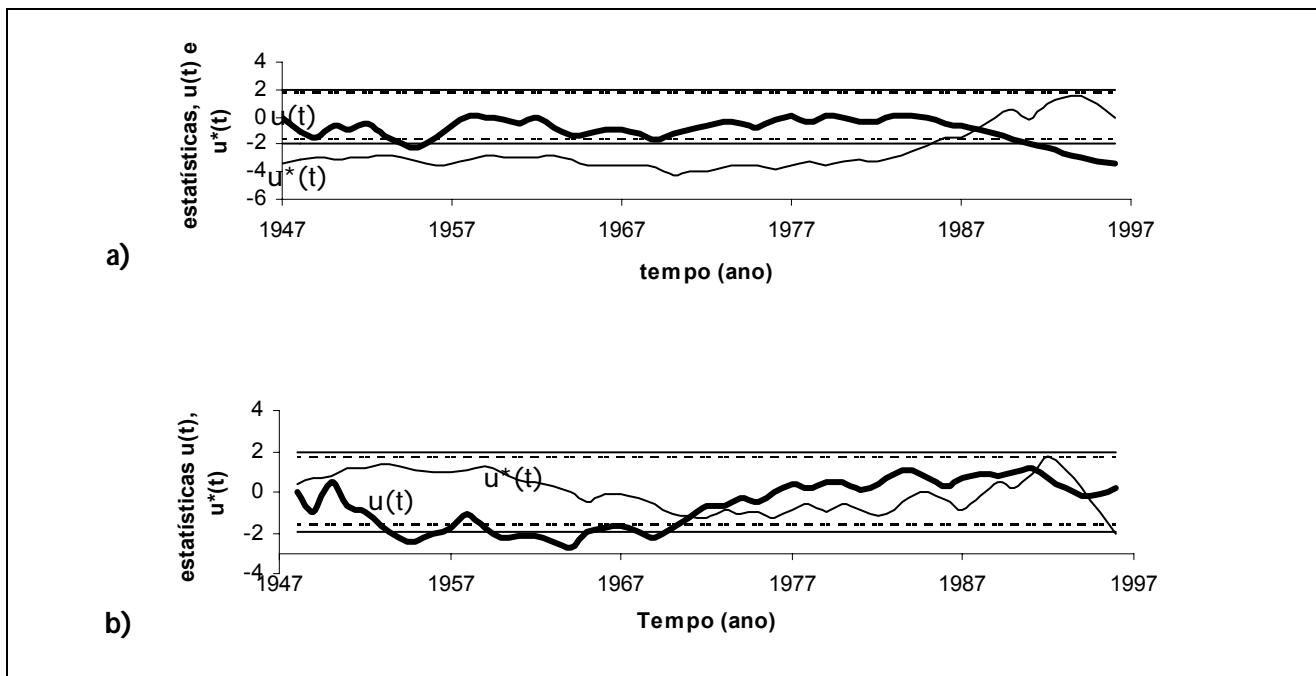


Figura 5 - Teste de Mann-Kendall das vazões mínimas de 7 dias: (a) do rio Jaguari no posto 3D-009 e (b) do rio Camanducaia no posto 3D-001 .

Tabela 1 - Sumário das análises estatísticas de Vazão*.

POSTO	VAZÃO	Período: 1947 – 1996	
		Mann-Kendall	Pettitt
Jaguari 3D-009	Máxima	T --- 1992 CP 1971	CP 1967 SL 0,004
Jaguari 3D-009	Mínima de 7 dias	T --- 1991 CP 1988	CP ns SL ns
Atibaia 3D-006	Máxima	T- CP ns	CP ns SL ns
Atibaia 3D-006	Mínima de 7 dias	T - CP ns	CP ns SL ns
Piracicaba CESP	Máxima	T + CP ns	CP ns SL ns
Piracicaba CESP	Mínima de 7 dias	T - CP ns	CP 1962 SL 0,02
Camanducaia 3D-001	Máxima	T +++ 1992 CP ns	CP 1979 SL 0,01
Camanducaia 3D-001	Mínima de 7 dias	T + CP ns	CP ns SL ns

*T+++ tendência positiva, com nível de significância $\alpha \leq 0,05$, T++ tendência positiva, com nível de significância $\alpha_0 \leq 0,1$; T+ tendência positiva mais não estatisticamente significativo; T- - tendência negativa, com nível de significância $\alpha_0 \leq 0,05$, T- - tendência negativa, com nível de significância $\alpha \leq 0,1$; T- tendência negativa mais não estatisticamente significativo; Mudança Brusca CP = ano de ocorrência; ns = não significativo, SL = nível de significância do teste de Pettitt.

Os resultados dos testes de Mann-Kendall e Pettitt aplicados nos rios do presente estudo são sumarizados na tabela 1.

Os resultados mostraram que de uma maneira geral existe um decréscimo nas vazões máximas e mínimas nos rios que estão sob a influência do Sistema Cantareira, e um acréscimo nas vazões do rio sem a influência acompanhando a tendência da precipitação, resultados similares foram obtidos nos trabalhos onde foram utilizadas as vazões médias (Moraes *et al.* 1998; Groppo *et al.* 2001).

O rio Jaguari apresentou tendências negativas estatisticamente significativas ($\alpha \leq 0,05$) a partir de 1992 para as vazões máximas e a partir de 1991 para as mínimas de 7 dias. Pode-se também observar através do teste de Pettitt que ocorreram mudanças bruscas na vazão máxima em 1967, coincidentemente com o início das obras de construção do Sistema Cantareira, e nas vazões mínimas de 7 dias em 1984, resultado este que está muito próximo do início da captação de água pelo Sistema Cantareira que começou para o rio Jaguari no ano de 1981.

O rio Atibaia apresentou tendência negativa, mas não significativa tanto nas vazões máximas quanto nas mínimas de 7 dias. O teste de Pettitt não

detectou mudanças bruscas significativas nas séries de vazões. Porém, Moraes *et al.* (1998) e Groppo *et al.* 2001, utilizando vazões médias, mostraram que existe uma tendência negativa estatisticamente significativa neste rio.

Já o rio Piracicaba apresentou tendência positiva não significativa nas vazões máximas, fato este que pode ser explicado em parte à distância entre o Sistema Cantareira (cabeceiras dos rios da bacia) e o posto (próximo ao exutório), e ainda ao aumento da contribuição pluviométrica. Entretanto, as vazões mínimas de 7 dias mostraram uma tendência negativa levemente significativa, o que pode ser um possível efeito das barragens.

O posto do rio Camanducaia que não sofre influência do Sistema e está sob o regime de chuvas similar ao do Jaguari (Moraes *et al.* 1998), apresentou tendências positivas tanto nas vazões máximas quanto nas vazões mínimas, sendo estatisticamente significativa a partir de 1992 para a vazão máxima, e não estatisticamente significativa na mínima de 7 dias, acompanhando a tendência positiva da precipitação. Pode-se também ser observado através do teste de Pettitt que ocorreu mudança brusca na vazão máxima neste posto em 1979.

Resultados dos estudos das vazões máximas e mínimas

Para ilustrar a versão gráfica desse estudo, são apresentadas na figura 6 (a,b) as distribuições acumuladas teóricas (Gumbel e Weibull) e de freqüência para as vazões mínimas e máximas do posto do rio Atibaia

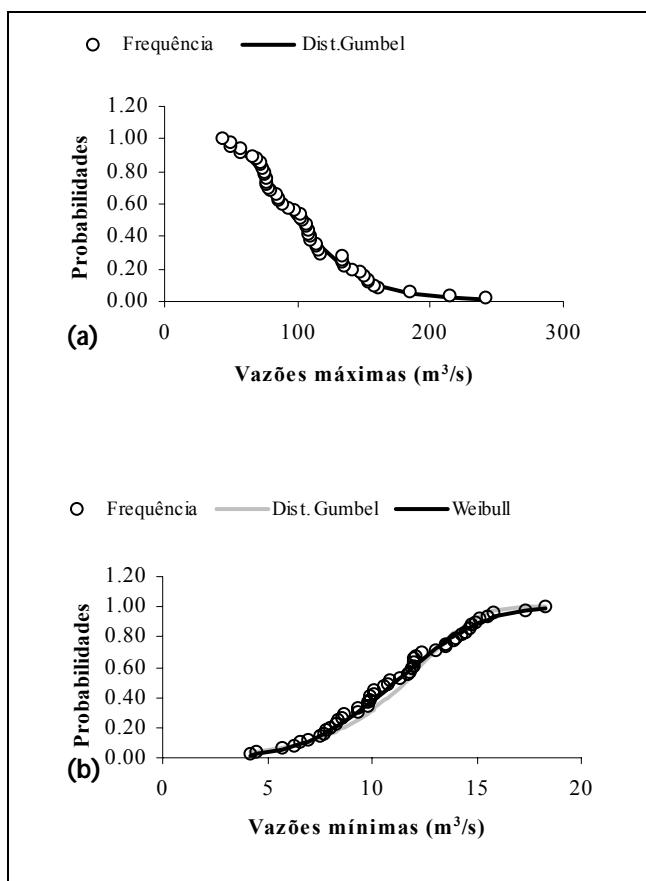


Figura 6 - Ajustes das distribuições de Gumbel para as vazões máximas (a); e Gumbel e Weibull para as vazões mínimas de 7 dias (b), para o posto do rio Atibaia (3D-006).

Os resultados dos estudos das vazões máximas e mínimas estão sumarizados na Tabela 2. As distribuições assintóticas dos extremos do tipo I para série de máximos, a distribuição assintótica dos

extremos do tipo I (Gumbel) para série de mínimos e distribuição assintótica do tipo III (Weibull) também para série de mínimos apresentaram boa aderência à distribuição teórica, comprovados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (significância de 5%) e o coeficiente de determinação (R^2). O ajuste de Weibull é superior ao de Gumbel para vazões mínimas, entretanto, os resultados da vazão $Q_{7,10}$ obtidos são similares empregando ambas as distribuições.

Para a análise da tabela 2, pode-se tomar como exemplo o comportamento das vazões máximas dos rios Jaguari e Camanducaia. No 1º período (1947 a 1981), para um período de retorno de 10 anos, os valores são 310,77 e 116,93 m³/s, respectivamente. Para o mesmo período de retorno, após o início da operação das barragens (2º período: 1982 a 1996), os valores passaram a ser de 173,20 e 158,21 m³/s, respectivamente. Isto evidencia a existência de uma diminuição nas vazões máximas do rio Jaguari após o início da operação das barragens, o que não ocorre com o Camanducaia, para o qual observou-se um aumento do valor.

A tabela 2 mostra que, de uma maneira geral, os resultados apontam para uma diminuição das vazões máximas para todos períodos de retorno e das vazões mínimas após o inicio da operação do Sistema para os rios Jaguari e Atibaia.

Os valores encontrados no posto do rio Piracicaba para a vazão máxima no 1º período (1947-1976) são menores que os valores encontrados no 2º período (1977-1996), as possíveis explicações para este fato, são as mesmas sugeridas no item de análise de tendências, ou seja, devido à localização do Sistema Cantareira nas cabeceiras dos rios da bacia o efeito da retirada de água é diminuído pela contribuição da precipitação em sua porção intermediária, e ainda ao aumento da precipitação no segundo período. Por outro lado, isto não acontece com as vazões mínimas de 7 dias com período de retorno de 10 anos, onde foi observada uma diminuição dos valores no 2º período.

Esse comportamento mostra que a operação das barragens influencia o regime hidrológico da bacia do Piracicaba na época de estiagem, mostrando que o efeito de regularização do Sistema não é significativo nas cidades perto do exutório da bacia, como Piracicaba. Por outro lado, as barragens não impedem a ocorrência de enchentes.

Para o posto do rio Camanducaia, pode-se observar aumento nas vazões máximas e mínimas no 2º período, mais uma vez seguindo o aumento da precipitação.

Tabela 2 - Vazões máximas e mínimas ($Q_{7,10}$) da bacia do rio Piracicaba.

Postos	Período	Vazões máximas (m^3/s) – Gumbel						$Q_{7,10}$ (m^3/s)		
		2	5	10	15	R^2	Gumbel	R^2	Weibull	R^2
3D-009	1947-1996	128,84	218,92	278,56	312,21	0,94	5,48	0,97	5,50	0,99
Jaguari	1947-1981	142,33	243,67	310,76	348,62	0,94	7,05	0,97	6,92	0,99
	1982-1996	101,18	144,51	173,20	189,39	0,93	4,09	0,99	4,15	0,94
3D-006	1947-1996	99,89	136,50	160,74	174,41	0,99	6,74	0,98	6,75	0,99
Atibaia	1947-1976	103,00	143,77	170,75	185,99	0,98	7,23	0,97	7,29	0,99
	1977-1996	95,37	124,92	144,49	155,53	0,99	6,21	0,98	6,37	0,99
CESP	1947-1996	475,92	654,33	772,45	839,09	0,99	26,15	0,99	26,01	0,99
Piracicaba	1947-1976	457,74	633,67	750,16	815,88	0,99	27,77	0,95	27,59	0,97
	1977-1996	502,89	686,66	808,33	876,97	0,98	23,47	0,98	23,67	0,97
3D-001	1947-1996	84,32	114,49	134,46	145,73	0,99	2,54	0,98	2,49	0,99
Camanducaia	1947-1981	74,53	100,04	116,93	126,46	0,99	2,76	0,94	2,61	0,98
	1982-1996	109,35	138,75	158,21	169,20	0,97	2,80	0,97	2,81	0,95

CONCLUSÃO

A análise de tendências e de valores extremos das vazões máximas e mínimas para diversos períodos de retorno, apontou o rio Jaguari como o mais afetado pelo efeito da operação das barragens do Sistema Cantareira. Nesse rio foram constatadas tendências negativas com nível de significância de 95% para as vazões máximas e mínimas de 7 dias, além de uma redução drástica desses valores, considerando todos os tempos de retorno, do 1º período (1947-1981) para o 2º período (1982-1996), na faixa de 40 a 60%.

O rio Atibaia também apresentou tendência negativa, mas não estatisticamente significativa, para as vazões máximas e mínimas de 7 dias. Pode-se notar, através das análises de valores extremos para diversos tempos de retorno, uma redução na vazão do 1º período (1947-1976) para o 2º período (1977-1996) mostrando a existência de alteração no regime de vazão.

O rio Camanducaia, que não é influenciado pelo Sistema Cantareira, apresenta tendências positivas nas vazões máximas e mínimas, seguindo a tendência positiva de precipitação, contrariamente ao que ocorre nos rios Atibaia e Jaguari.

O rio Piracicaba, apresenta um comportamento atenuado com relação às vazões máximas na época de chuvas, ou seja, as vazões máximas mostraram um aumento no período estudado, não havendo nesse caso uma influência direta do Sistema Cantareira. O mesmo não ocorre com as vazões mínimas, sendo observadas tendências negativas leve-

mente significativas (nível de significância de 90%) no período estudado.

As alterações no comportamento das séries temporais, detectadas pelos testes estatísticos, coincidem com histórico da construção do Sistema Cantareira e sua operação, ou seja, a retirada da água para o abastecimento da região metropolitana de São Paulo, iniciada em 1976 no rio Atibaia e em 1981 no rio Jaguari, ambos com reflexos no rio Piracicaba, vem provocando alterações no regime hidrológico desses rios.

REFERÊNCIAS

- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. 1988. Applied hydrology. 1. ed. New York: Mc Graw-Hill publishing Company, 572p.
- CLARKE, R. T., BRUSA, L. C. 1997. O método *bootstrap* para detectar tendências em séries de vazão, In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Vitória, ES. Anais 2, Vitória: Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos, p. 621-628.
- DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 1988. Plano global dos recursos hídricos da bacia do rio Piracicaba-2ª. etapa. v.2. Tecnosan.
- GOOSSENS, C.; BERGER, A. 1986. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. Annales Geophysicae, 4, B, 4, p. 385-400.
- GROOPPO, J.D.; GUAMERO, M.E.; MILDE, L.C.E.; MORAES, J.M.; MARTINELLI, L.A. 2001. Análise de séries temporais de vazão e de precipitação na bacia do

- rio Piracicaba. Revista de Ciência & Tecnologia, v.9, n.18, p.109-117.
- GROPPY, J.D.; MORAES, J.M.; GENOVEZ, A.M.; MARTINELLI, L.A. 2006. Estudo de tendência de parâmetros de qualidade de água na bacia do rio Piracicaba. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 11, nº 3, jul/set, pp. 79-87.
- HOSKING, J. R. M. 1985. Algorithm AS 215: Maximum-likelihood estimation of the parameters of the generalized extreme-value distribution. *Journal of the Royal Statistical Society. Applied Statistics*, v. 34, p. 301-310.
- JENKINSON, A. F. 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.81, p. 158-171.
- KRUSCHE, A. V.; CARVALHO, F. P.; MORAES, J. M.; BALLESTER, M. V. R.; HORNINK, S.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. 1997. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin, Brazil. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 33, nº 5.
- LANNA, A.E. 2001. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C.E.M., org. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/ABRH. p. 79-176.
- MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., UVÖ, C. R. B. 1996. On the Suitability of Non-Parametric Tests for Detection of Trends in Brasilian Rivers, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOREOLOGIA, Campos de Jordão, S.P.. Anais. p. 1492-1495.
- MARTINELLI, L. A.; KRUSCHE, A. V.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; BERNARDES, M.; FERRAZ, E. S.; MORAES, J. M. & BALLESTER, M. V. 1999. Effects of sewage on the chemical composition of Piracicaba River, SouthEast Brazil. *Water, Air and Soil Pollution*, 110:67-69.
- MARTINS, E.S.; STENDINGER, J.R. 2000. Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research*, v.36, p.737-744.
- MORAES, J. M. ;PELLEGRINO, G. Q.; BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; KRUSCH, A. V. 1995. Estudo Preliminar da Evolução Temporal dos Componentes do Ciclo Hidrológico da Bacia do Rio Piracicaba". In: XI Simpósio de Recursos Hídricos e do II Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos países de Língua Oficial Portuguesa, Recife, PE, 1995. Anais - Porto Alegre: ABRH, pp.27-32.
- MORAES, J. M.; PELLEGRINO, G. Q.; BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; KRUSCHE, A. V., 1998. Trends in hydrological parameters of a southern Brazilian watershed and its relation to human induced changes, *Water Resources Management*, vol. 12, 295-311pp.
- MORAES, J. M.; BALLESTER, M.V.; GENOVEZ, A.M.; KRUSH, A.V.; MARTINELLI, L.A.; MORTATTI, J.; VICTORIA, R.L. 1997. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2, n.2, p.65-79.
- PELLEGRINO, G. Q.; MORAES, J M.; GUANDIQUE, E.M.; BALLESTER, M.V.; MARTINELLI, L.A.; VICTORIA, R.L. 2001. Análise Espaço Temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do Rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 9, no. 1, pp.125-135.
- PELLEGRINO, G.D. 1995. Análise espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio Piracicaba. Piracicaba, Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo. 117p.
- PETTITT,A.N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28, 2, pp. 126-135.
- PROCHNOW, M.C.R. 1981. A qualidade das águas na bacia do rio Piracicaba. Rio Claro, 168p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.
- SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. 1990. Comitê Coordenador do Plano e do Sistema Estadual de Recursos Hídricos; Grupo Técnico do Plano Estadual de Recursos Hídricos. Plano estadual de recursos hídricos: Primeiro plano do Estado de São Paulo. São Paulo.
- SHIFLEY, S.; LENTZ, E. 1985. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. *Forest Ecology and Management*, , v.13, p.195-203.
- SILVEIRA E SILVEIRA. 2001. Vazões Mínimas. In: PAIVA, J.B.D. E PAIVA, E.M.C.D. org. Hidrologia Aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: UFSM/ABRH. p.125-163.
- SMITH, R.L. 1985. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases. *Biometrika*, London, v.72, p.67-92.
- SNEYERS, R. 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Note Technique No. 143, OMM - No.415, Genève, 192p.
- WAYLEN, P.R.; CAVIEDES, C.N. 1990. Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the Aconcagua river basin, Chile. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.102, p.79-88.

Analysis of the Effect of Operating the Cantareira System Dams on the Hydrologic Behavior of the Piracicaba River

ABSTRACT

Since the beginning of the 70's the Piracicaba river basin has been a center of waste generation and water consumption activities. This scenario has been aggravated by 31 m³/s of water exported from the basin to the metropolitan region of São Paulo city. Aiming to present useful information to the water management organizations, the main goal of this work is to study the behavior of the extreme flow values (maximum and minimum) of some rivers in this basin and evaluate the influence of reservoir operation on these parameters. The results showed a significant decrease of the maximum and minimum flow in the Jaguari and Atibaia rivers after the beginning of reservoir operation. On the other hand, in the Piracicaba river far from the set of reservoirs increased maximum flow and decreased minimum flow were observed.

Keywords: trend analysis; changing point; time series; maximum flows; minimum flows; hydrology.