



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA
NÍVEL DOUTORADO

AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA CAUSADAS PELA
CONSTRUÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA

ADRIANO VICTOR LOPES DA SILVA

Tese de Doutorado

RECIFE – PE

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

ADRIANO VICTOR LOPES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA
CAUSADAS PELA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada.

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tatijana Stošić.

Co-orientador: Prof. Dr. Borko D. Stošić.

RECIFE – PE

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

ADRIANO VICTOR LOPES DA SILVA

Tese sobre o título **AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA CAUSADAS PELA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA CANTAREIRA** apresentada por Adriano Victor Lopes da Silva e aprovada em 23 de setembro de 2014, Recife, Estado de Pernambuco pela banca examinadora constituída por:

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Tatijana Stošić
DEINFO - UFRPE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Borko Stošić
DEINFO - UFRPE

Prof. Dr. Geber Barbosa Albuquerque Moura
DEPA - UFRPE

Prof. Dr. Julio Cesar Ferreira de Melo Junior
CEAGRO - UNIVASF

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
DEINFO - UFRPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e a
minha querida afilhada:
Janildo Lopes da Silva, Maria de
Lourdes Lopes da Silva e Emilly Júlia
Nunes Seixá da Mota

AGRADECIMENTOS

A minha filha Luísa Jamir Lopes da Silva, estímulo maior, presente de Deus.

Aos meus pais, a minha irmã Adriana Rachel, avó Amara Ferreira, tios e primos pelo estímulo, suporte, carinho e estrutura familiar.

A minha querida esposa Erika Jamir pelo amor, dedicação e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus sogros, Ricardo Castro e Lidia Jamir, pela compreensão e pelo apoio em todos os momentos.

Em especial, a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Tatijana Stošić, meu muito obrigado pela amizade, carinho, paciência e orientação ao longo de todos os anos.

À UFRPE, pela valiosa acolhida no treinamento em nível de pós-graduação e aos professores do programa de pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada.

À UNIVASF, que tornou possível a conclusão deste trabalho, em particular ao apoio incondicional do Colegiado de Engenharia Agrônômica (CEAGRO).

Aos membros da banca examinadora, pelas acertadas contribuições e especialmente ao Prof. Dr. Julio Cesar Ferreira de Melo Junior, não só pela amizade, carinho e auxílio técnico, mas, principalmente, pelo exemplo de persistência, determinação, coragem e competência.

Aos amigos Abraão David, Evando Araujo, Julio Fujimaki e Moacy Cabral pela amizade, consideração, contribuição e incentivo na obtenção do sucesso.

Ao secretário do curso e amigo, Marco Antônio, pelos préstimos e atenção dispensados.

RESUMO

Recursos hídricos são diretamente influenciados pelos fatores naturais e antrópicos, que se caracterizam por múltiplas interações, ainda mal compreendidas, fazendo com que os sistemas hidrológicos sejam de alta complexidade para estudar e gerenciar. Alterações hidrológicas podem afetar vários componentes dos ecossistemas com consequências cada vez mais graves e imprevisíveis. A fim de estabelecer políticas públicas eficientes para a proteção do meio ambiente, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos matemáticos que forneçam informações sobre alterações hidrológicas causadas pela atividade humana e como elas afetam o ecossistema. Neste trabalho, analisou-se a variação temporal das condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Piracicaba causada pela construção de reservatórios de água do Sistema Cantareira. Foram aplicados métodos Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) e *Range of Variability Approach* (RVA) nas séries temporais de vazão diária comparando os períodos antes e depois da construção de reservatórios de água. As características de vazão são avaliadas pelo cálculo de 33 indicadores IHA separados em cinco grupos: magnitude de condições de água mensal, magnitude e duração de condições extremas de água anual, sincronismo de condições extremas de água anual, frequência e duração dos pulsos de alta e baixa vazão, taxa e frequência de mudanças de condição da água. Os limites do RVA para análise estatística não paramétrica foram utilizados para calcular o fator de alteração hidrológica (HA) e avaliar o grau de alteração causada pela construção do reservatório. Também se aplicou o termo da distância de Canberra como um método alternativo de cálculo HA. Os resultados são semelhantes aos obtidos por RVA na forma original, indicando que as condições hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba foram alteradas nos locais perto de reservatórios de água. Esta análise fornece novas informações, mais detalhadas, sobre alteração hidrológica na bacia, que deve ser considerada quando do planejamento do uso da água, sem ameaçar a estabilidade ambiental do ecossistema.

Palavras chave: Sistema Cantareira, Indicadores de Alteração Hidrológica, Range of Variability Approach.

ABSTRACT

Hydric resources are directly influenced by the natural and antropogenic factors that are characterized by multiple interactions, still poorly understood, making hydrological systems highly complex to study and manage. Hydrological alterations can affect various components of related ecosystems with increasingly serious and unpredictable consequences. In order to establish efficient public policies for environmental protection, it is necessary to develop mathematical methods that will provide information about hydrological alterations caused by human activity and how they affect the ecosystem. In this work we analyzed temporal variation of hydrological conditions of Piracicaba river basin caused by the construction of water reservoirs of Cantareira System. We applied methods Indicators of Hydrological Alteration (IHA) and Range of Variability Approach (RVA) on daily streamflow temporal séries comparing periods before and after the construction of water reservoirs. The characteristics of streamflow are evaluated by calculating 33 IHA indicators separated in five groups: magnitude of monthly water conditions, magnitude and duration of annual extreme water conditions, timing of annual extreme water conditions, frequency and duration of high- and low- flow pulses, rate and frequency of water-condition changes. The RVA limits for non parametric statistical analysis were used to calculate Factor of Hydrological Alteration (HA) and evaluate the degree of alteration caused by reservoir construction. We also applied the Canberra distance as an alternative method of HA calculation. The results are similar to those obtained by RVA in original form, indicating that the hydrological conditions in Piracicaba river basin were altered at the locations close to water reservoirs. This analysis provides new more detailed information about hydrological alteration in the basin which should be considered when planning the use of water without threatening the environmental stability of ecosystem.

Keywords: Cantareira System, Hydrological Alteration, Range of Variability Approach.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de distribuição dos volumes de água armazenados pelo Sistema Cantareira [14].....	5
Figura 2. Sistema Cantareira no segundo semestre de 2014 [10].....	6
Figura 3. Localização da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, no Estado de São Paulo, Brasil, mostrando os principais rios, estações de medições e reservatórios do Sistema Cantareira. As estações de medições de vazão utilizadas foram: (3D-009) na bacia hidrográfica do rio Jaguari e (3D-006) na bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	8
Figura 4. Série temporal da vazão diária da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	16
Figura 5. Fatores de alteração hidrológica HA (25% - 75%) x HA (33% - 67%) da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA central.....	20
Figura 6. Alteração da distribuição sazonal das vazões mensais da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	20
Figura 7. Série temporal da vazão mensal de janeiro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	21
Figura 8. Série temporal da vazão mensal de fevereiro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	22
Figura 9. Série temporal da vazão mensal de março da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	22
Figura 10. Série temporal da vazão mensal de abril da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	23
Figura 11. Série temporal da vazão mensal de maio da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	23

Figura 12. Série temporal da vazão mensal de junho da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	24
Figura 13. Série temporal da vazão mensal de julho da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	24
Figura 14. Série temporal da vazão mensal de agosto da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	25
Figura 15. Série temporal da vazão mensal de setembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	25
Figura 16. Série temporal da vazão mensal de outubro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	26
Figura 17. Série temporal da vazão mensal de novembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	26
Figura 18. Série temporal da vazão mensal de dezembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	27
Figura 19. Série temporal da vazão mínima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	28
Figura 20. Série temporal da vazão mínima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	28
Figura 21. Série temporal da vazão mínima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	29
Figura 22. Série temporal da vazão mínima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	29
Figura 23. Série temporal da vazão mínima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	30

Figura 24. Série temporal da vazão máxima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	30
Figura 25. Série temporal da vazão máxima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	31
Figura 26. Série temporal da vazão máxima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	31
Figura 27. Série temporal da vazão máxima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	32
Figura 28. Série temporal da vazão máxima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	32
Figura 29. Série temporal do número de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	33
Figura 30. Série temporal da duração de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	34
Figura 31. Série temporal do número de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	34
Figura 32. Série temporal da duração de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	35
Figura 33. Série temporal da taxa de crescimento da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	35
Figura 34. Série temporal da taxa de queda da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	36
Figura 35. Série temporal do número de reversões da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	36

Figura 36. Série temporal da vazão diária da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	37
Figura 37. Fatores de alteração hidrológica HA (25% - 75%) x HA (33% - 67%) da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA central.....	41
Figura 38. Alteração da distribuição sazonal das vazões mensais da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	41
Figura 39. Série temporal da vazão mensal de janeiro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	42
Figura 40. Série temporal da vazão mensal de fevereiro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	43
Figura 41. Série temporal da vazão mensal de março da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	43
Figura 42. Série temporal da vazão mensal de abril da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	44
Figura 43. Série temporal da vazão mensal de maio da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	44
Figura 44. Série temporal da vazão mensal de junho da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	45
Figura 45. Série temporal da vazão mensal de julho da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	45
Figura 46. Série temporal da vazão mensal de agosto da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	46
Figura 47. Série temporal da vazão mensal de setembro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	46

Figura 48. Série temporal da vazão mensal de outubro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	47
Figura 49. Série temporal da vazão mensal de novembro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	47
Figura 50. Série temporal da vazão mensal de dezembro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	48
Figura 51. Série temporal da vazão mínima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	49
Figura 52. Série temporal da vazão mínima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	49
Figura 53. Série temporal da vazão mínima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	50
Figura 54. Série temporal da vazão mínima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	50
Figura 55. Série temporal da vazão mínima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	51
Figura 56. Série temporal da vazão máxima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	51
Figura 57. Série temporal da vazão máxima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	52
Figura 58. Série temporal da vazão máxima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	52
Figura 59. Série temporal da vazão máxima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	53

Figura 60. Série temporal da vazão máxima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	53
Figura 61. Série temporal do número de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	55
Figura 62. Série temporal da duração de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	55
Figura 63. Série temporal do número de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	56
Figura 64. Série temporal da duração de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	56
Figura 65. Série temporal da taxa de queda da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	57
Figura 66. Série temporal da taxa de crescimento da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	57
Figura 67. Série temporal do número de reversões da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.....	58
Figura 68. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA Inferior.....	61
Figura 69. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA Central.....	61
Figura 70. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA Superior.....	62
Figura 71. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA Inferior.....	62

Figura 72. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA Central.....	63
Figura 73. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA Superior.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros hidrológicos e as suas características utilizados no IHA [13].....	11
Tabela 2. Conjunto de dados das vazões diárias das sub-bacias do rio Piracicaba.....	14
Tabela 3. Estatística descritiva dos 33 parâmetros do IHA da bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	17
Tabela 4. Limites RVA \pm 17 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	18
Tabela 5. Limites RVA \pm 25 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	19
Tabela 6. Estatística descritiva dos 33 parâmetros do IHA da bacia hidrográfica do rio Jaguari.....	38
Tabela 7. Limites RVA \pm 17 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.....	39
Tabela 8. Limites RVA \pm 25 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.....	40
Tabela 9. Limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HAc) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	59
Tabela 10. Limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HAc) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.....	60
Tabela 11. Distância de Canberra dos indicadores hidrológicos do IHA nas diferentes faixas do RVA para as sub-bacias hidrográficas do rio Piracicaba.....	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 BACIA HIDROGRÁFICA E SISTEMA CANTAREIRA.....	3
2.1.1 Bacia hidrográfica	3
2.1.2 Processos hidrológicos.....	3
2.1.3 Bacia hidrográfica do rio Piracicaba e Sistema Cantareira	4
2.1.4 Alteração hidrológica.....	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1 DESCRIÇÃO DADOS	8
3.2 INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA (IHA)	9
3.3 RANGE OF VARIABILITY APPROACH (RVA).....	12
3.4 DISTÂNCIA DE CANBERRA.....	13
3.5 METODOLOGIA	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5. CONCLUSÕES	65
6. REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

Um ponto crítico para o desenvolvimento sustentável de uma região é a conservação de seus recursos hídricos. Os recursos hídricos recebem influência direta de fatores naturais e antrópicos e caracterizam-se pelas interações múltiplas, que ainda são pouco entendidas, tornando o regime hidrológico bastante complexo. Na busca pela tomada de decisão mais acertada e eficiente para a proteção do meio ambiente, muitas vezes se mostra necessário desenvolver modelos matemáticos que possibilitem o fornecimento de informações significativas para o estabelecimento de políticas públicas. A previsão de cenários pode ser alcançada por meio de modelos matemáticos [1] e simulações computacionais, utilizando dados hidrológicos captados ao longo do tempo, como dados da vazão e da precipitação pluvial, pois estes são essenciais para determinar a disponibilidade hídrica [2,3].

É importante quantificar a vazão de um regime hidrológico usando os parâmetros hidrológicos que são biologicamente relevantes e avaliar o grau de alteração do regime natural causado pelas atividades humanas, como construção de reservatórios, mudanças de uso de solo e cobertura vegetal e instalação de sistemas de irrigação [4]. As principais alterações hidrológicas que provocam degradação nos rios e ecossistemas das bacias são as perdas de conectividade jusante-montante do rio e eventualmente da bacia, alteração do pulso de inundação e das relações rio-planície de inundação, alteração do regime hidrológico e alteração do regime natural da qualidade da água [5].

Com objetivo de caracterizar a variação temporal das condições hidrológicas utilizando atributos biológicos e sensíveis a influências humanas, Richter et al.[4] desenvolveram o método de Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA), que tem como finalidade avaliar, a partir de 33 indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes, a variação de uma série de dados hidrológicos durante os períodos pré-impacto e pós-impacto provocado pela atividade humana.

No final da década de 90, uma nova abordagem para gestão do ecossistema é definida para deflúvio dos rios, Range of Variability Approach (RVA). O método destina-se à aplicação em rios para conservação da biodiversidade aquática nativa e proteção das funções dos ecossistemas naturais e utilizam os 33 indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes do método IHA [6].

Existem, ainda, métodos alternativos para avaliar complexidade dos sistemas hidrológicos, que são baseados na teoria da informação e na teoria multifractal e foram

utilizados para modelar distribuição espacial e temporal das principais variáveis hidrológicas, precipitação pluvial, vazão fluvial dos rios e as taxas de propagação de informação em séries temporais de vazão [7, 8, 9, 10].

O Sudeste do Brasil é uma região que apresenta um crescimento populacional e agroindustrial maior que a média de país, com fortes evidências de degradação dos recursos hídricos em aspectos quantitativos e qualitativos. Nessa região, está localizada a bacia hidrográfica do rio Piracicaba e desde a década de 1960 vem passando por grandes transformações urbana, industrial e da produção agrícola, o que alterou seus recursos hídricos. A atividade humana que mais influenciou na disponibilidade hídrica da bacia foi a construção dos reservatórios do Sistema Cantareira, concebido nas décadas de 1970 e 1980 para atender a uma demanda crescente de volume de água na Região Metropolitana de São Paulo [11,12,13].

O Sistema Cantareira foi idealizado na construção de quatro reservatórios, sendo três localizados na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Piracicaba (Jaguari, Jacareí, Atibainha e Cachoeira) e outro na bacia hidrográfica do Alto Tietê (Juqueri). Estes reservatórios são interligados por adutoras e são responsáveis pela reversão interbacias de 31 m³/s para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, entrando em operação em 1975 para o rio Atibaia (Atibainha e Cachoeira) e em 1982 para os rios Jaguari e Jacareí [14].

Para avaliar a influência da construção do Sistema Cantareira nas condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, vários estudos sobre as alterações hidrológicas foram realizados. A influência das operações das barragens através da análise de tendência revelou uma tendência decrescente da vazão em locais próximos aos reservatórios dos rios Atibaia e Jaguari [13].

Em face do exposto, objetiva-se, por intermédio das aplicações dos métodos Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) e Range of Variability Approach (RVA), quantificar a influência da construção dos reservatórios do Sistema Cantareira na vazão dos rios Atibaia e Jaguari por meio de gráficos, tabelas e do fator de alteração hidrológica (HA). Ademais, realizar a proposta de um fator de alteração hidrológica (HAc) baseado na distância de Canberra, além de utilizar a distância de Canberra para cada faixa do RVA como critério de comparação das alterações hidrológicas entre as bacias hidrográficas.

A tese encontra-se dividida em seis tópicos. Este primeiro tópico corresponde à introdução, o segundo tópico aborda o Sistema Cantareira e os conceitos de bacia hidrográfica, processos hidrológicos e alterações hidrológicas, além de descrever os métodos IHA e RVA. As descrições dos dados e da proposta de um fator de alteração hidrológica baseado no termo da distância de Canberra são realizadas no terceiro tópico. No quarto e

quinto tópicos, são apresentados resultados, discussões e conclusões sobre as duas sub-bacias hidrográficas do rio Piracicaba. E por último, os referenciais teóricos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BACIA HIDROGRÁFICA E SISTEMA CANTAREIRA

2.1.1 Bacia hidrográfica

Ao longo do tempo, diversas definições de bacia hidrográfica foram propostas, em geral, como uma área de concentração de determinada rede de drenagem e recursos naturais. Basicamente, a bacia hidrográfica consiste em uma porção de superfície terrestre drenada por um rio principal e seus afluentes e pode ser descrita por suas características geomorfológicas, relevo, área de drenagem, geologia, rede de drenagem, solo, tipo da cobertura vegetal existente e as ações antrópicas, como uso do solo, construção dos reservatórios [15,16,17]. A importância da compreensão do conceito de bacia hidrográfica por gestores e pesquisadores, no contexto atual, é pelo fato de considerar a bacia hidrográfica como unidade de estudo, planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Para gestão de recursos hídricos, alguns princípios e normas foram adotados pela Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de Janeiro de 1997 [15].

A bacia hidrográfica além de envolver componentes de processos geofísicos, econômicos e sociais, também é uma unidade de estudo para conceituar e compreender os ecossistemas e o gerenciamento de usos múltiplos e conservação de recursos naturais [18,19]. No Brasil, destacam-se algumas bacias hidrográficas com reservatórios e barragens para fins de agricultura irrigada, geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, tais como: rio Tocantins, rio São Francisco, rio Iguaçu, rio Jacuí, rio Uruguai, rio Paraná, rio Paranaíba, rio Grande, rio Piracicaba, rio Paraíba do Sul, entre outras [20].

2.1.2 Processos hidrológicos

As características geomorfológicas influenciam diretamente os processos hidrológicos das bacias hidrográficas, como evaporação, evapotranspiração, precipitação, escoamento superficial e escoamento subterrâneo nos diferentes fatores climáticos, físicos e decorrentes das ações antrópicas [17,18].

Os elementos meteorológicos influenciam o escoamento superficial no processo hidrológico quanto à intensidade e duração da precipitação [21,22]. No Brasil, o principal processo da hidrologia, com maior capacidade de produzir escoamento, é a precipitação pluvial que, ao atingir o solo, divide-se em dois segmentos, um transforma-se em escoamento superficial e o outro infiltra-se no solo e alimentará os aquíferos subterrâneos que irão, por ventura, contribuir com o escoamento de base do curso d'água [23].

Os fatores físicos que influenciam o escoamento superficial são as formas e áreas da bacia hidrográfica, a topografia da bacia e a capacidade de infiltração do solo [24]. A influência da área e forma da bacia hidrográfica é no sentido de que, quanto maior a sua extensão, maior a quantidade de água que a bacia pode captar, além do que as bacias compactas tendem a concentrar o escoamento no canal principal que drena a bacia, mais rapidamente, aumentando os riscos de inundação. O efeito da topografia sobre o escoamento superficial é por intermédio da declividade da bacia, já no tocante à capacidade de infiltração do solo, é influenciada pela textura, estrutura e capacidade de infiltração do solo e quanto maior a capacidade de infiltração, menor a formação de escoamento superficial [25].

A importância da vegetação na interceptação da chuva diminui a variação da vazão ao longo do ano, além de atuar sobre os processos de evaporação e de evapotranspiração, os quais alteram a quantidade da água precipitada que se transforma em vazão [26].

A variação do escoamento superficial no processo hidrológico está relacionada à alteração em produção de sedimentos, causando enorme problema no Brasil, pois a cada ano são perdidos mais de 600 milhões de toneladas de solo agrícola, além de sementes, defensivos e fertilizantes [27].

2.1.3 Bacia hidrográfica do rio Piracicaba e Sistema Cantareira

O Sudeste do Brasil é uma região com crescimento populacional e agroindustrial maior que a média de país, com fortes evidências de degradação dos recursos hídricos em aspectos quantitativos e qualitativos. Nessa região é onde está localizada a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, com uma área total de 12.568,72 km², dividida em 11.442,82 km² pertencentes ao estado de São Paulo, e 1.125,90 km² ao estado de Minas Gerais. A classificação climática de Köppen da região é "Cwa"[43] e o clima é subtropical, com temperatura de médias anuais variando entre 18° e 22° C, a precipitação média anual de 1400

mm, vazão média anual de $156 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e vazão mínima de $35,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ referente a 95% da curva de permanência [28].

Desde a década de 1960, a região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba passou por grande transformação urbana, industrial e de produção agrícola, alterando seus recursos hídricos. A atividade humana que mais influenciou na disponibilidade hídrica da bacia foi à construção dos reservatórios do Sistema Cantareira, que foi concebido nas décadas de 1970 e 1980 para atender a uma demanda crescente por água na Região Metropolitana de São Paulo [14]. O Sistema Cantareira é formado por seis represas (Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras) em 12 municípios, quatro em Minas Gerais e oito em São Paulo, totalizando uma área de aproximadamente $2.279,5 \text{ km}^2$ [28].

O Sistema Cantareira foi idealizado na construção de quatro reservatórios, três localizados na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Piracicaba (Jaguari, Jacareí, Atibainha e Cachoeira) e outro na bacia hidrográfica do Alto Tietê (Juqueri). Estes reservatórios são interligados por adutoras e são responsáveis pela reversão interbacias de $31 \text{ m}^3/\text{s}$ para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, entrando em operação em 1975 para os rios Atibainha e Cachoeira, e em 1982 para os rios Jaguari e Jacareí. O perfil do Sistema Cantareira, incluindo os reservatórios e adutoras, está apresentado na Figura 1.

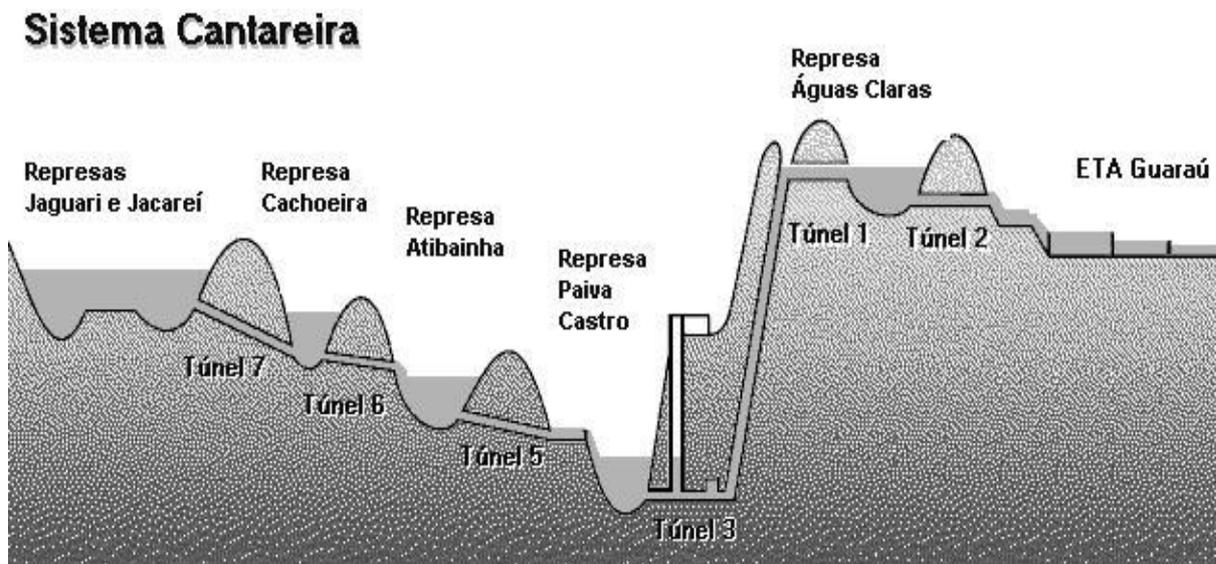


Figura 1. Perfil de distribuição dos volumes de água armazenados pelo Sistema Cantareira [14].

No segundo semestre de 2014, o Sistema Cantareira chegou aos menores níveis da sua história, menos de 6 % da capacidade, como apresentado na Figura 2. Com isso, as obras para retirada do volume morto foram iniciadas nas represas de Atibainha e Jaguari para abastecer os moradores da região metropolitana de São Paulo [14].



Figura 2. Sistema Cantareira no segundo semestre de 2014 [29].

2.1.4 Alteração hidrológica

A composição biótica, estrutural e o funcionamento do ecossistema da bacia hidrográfica dependem principalmente do regime hidrológico e podem ser desequilibrados pelas variações nas condições hidrológicas, de origens naturais e antrópicas. Para avaliar a influência destas alterações (que é um pré-requisito para desenvolvimento de métodos de proteção de meio ambiente), é importante quantificar o regime hidrológico usando os parâmetros hidrológicos que são biologicamente relevantes e avaliar o grau de alteração do regime natural causado pelas atividades humanas, como construção de reservatórios, mudanças de uso de solo e cobertura vegetal e instalação de sistemas de irrigação, entre outros [4]. As principais alterações hidrológicas que provocam degradação nos rios e ecossistemas das bacias são as perdas de conectividade jusante-montante do rio e eventualmente da bacia, alteração do pulso de inundação e das relações rio-planície de inundação, alteração do regime hidrológico e alteração do regime natural da qualidade da água [5].

Os seres humanos se apropriaram de cerca de 50% da água doce acessível pelo escoamento global, e as estimativas conservadoras indicam que essa apropriação pode chegar

a 70% até 2025 [30]. As implicações ambientais da apropriação humana de grandes quantidades de água em escala global são profundas: diminuindo quantidades de água doce que estão disponíveis para manter os valores ecológicos e serviços ecossistêmicos [5].

Uma das principais intervenções antrópicas nas bacias hidrográficas é a construção de reservatórios e barragens. Estas estruturas hidráulicas são construídas para armazenar água para compensar flutuações na vazão do rio, proporcionando assim uma medida de controle humano dos recursos hídricos, ou para elevar o nível de água, ou aumentar a carga hidráulica [31]. A criação de armazenamento permite a geração de energia elétrica, abastecimento de água para a agricultura, as indústrias e os municípios [5].

Além das atividades antrópicas, alguns fenômenos naturais influenciam diretamente na alteração, como, por exemplo, o El Niño Oscilação Sul (ENOS), um dos fenômenos de grande escala que mais afetam o tempo e o clima de diferentes locais na superfície terrestre [46]. O ENOS se caracteriza por anomalias da temperatura da superfície do mar na região do Pacífico Equatorial e afeta a chuva nas diferentes regiões do Brasil, modificando a frequência, a intensidade e a quantidade da precipitação [46,47].

Para avaliar a influência da construção do Sistema Cantareira nas condições hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Piracicaba vários estudos sobre as alterações hidrológicas foram realizados. Os resultados mais importantes são sobre a variabilidade da qualidade da água no decorrer do tempo e os efeitos do esgoto na composição química da bacia hidrográfica do rio Piracicaba [11, 12], além do comportamento dos indicadores de valores extremos, vazão máxima e mínima, dos rios do Sistema Cantareira e a influência das operações das barragens por meio de análise de tendência [13, 32]. Recentemente, a análise de multifractal e a análise de complexidade foram aplicadas nas séries temporais diárias da vazão e precipitação fluvial, verificando alteração hidrológica após a construção dos reservatórios [33].

Em diferentes partes do mundo, desde a década de 90, os métodos IHA e RVA estão sendo utilizados com êxito para avaliar as alterações hidrológicas após as construções de reservatórios, tais como o rio Amarelo na China, rio Patuca na América Central e rio Willamente afluente do rio Colúmbia nos Estados Unidos da América [39,40,41].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DADOS

Neste trabalho, foram analisadas as séries temporais de vazão das sub-bacias hidrográficas do rio Atibaia e do rio Jaguari, da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, localizada no estado de São Paulo, Brasil. As séries temporais diárias de vazão são das estações 3D-006 (Atibaia, latitude 22°58'59" S, longitude 46°49'46" W) e 3D-009 (Jaguari, latitude 22°51'02" S, longitude 46°46'47" W), apresentadas na Figura 3, junto com principais rios e reservatórios do Sistema Cantareira. O Sistema Cantareira, que foi construído para a transferência da água da bacia hidrográfica do rio Piracicaba para a Região Metropolitana de São Paulo, inclui reservatórios no rio Atibaia (construção de 1968 a 1974) e no rio Jaguari (construção de 1978 a 1981) [15]. Os dados foram obtidos do site do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica (<http://www.dae.sp.gov.br/>).



Figura 3. Localização da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, no estado de São Paulo, Brasil, mostrando os principais rios, estações de medições e reservatórios do Sistema Cantareira. As estações de medições de vazão utilizadas foram: (3D-009) na bacia hidrográfica do rio Jaguari e (3D-006) na bacia hidrográfica do rio Atibaia [33].

3.2 INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA (IHA)

Os Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) têm como finalidade avaliar informações de uma série de dados hidrológicos durante os períodos pré-impacto e pós-impacto causado pela atividade humana e converter em um conjunto de 33 indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes [4].

O objetivo é caracterizar a variação temporal das condições hidrológicas utilizando atributos que são biologicamente relevantes e sensíveis a influências humanas, tais como operações de reservatórios, águas subterrâneas, bombeamento e desvios agrícolas. Muitos atributos de regimes hidrológicos podem ser usados para modelar a composição biótica aquática, zonas úmidas e ecossistemas ribeirinhos. O método IHA é baseado em 33 indicadores hidrológicos biologicamente relevantes, divididos em cinco grupos (magnitude, duração, tempo, frequência e taxa de mudança) para caracterizar estatisticamente a variação hidrológica anual, apresentados na Tabela 1 [4].

Grupo 1: Magnitude.

A magnitude da condição da água em um determinado momento é uma medida da sua disponibilidade e adequação de habitat. A magnitude é caracterizada pelas condições da água mensais sendo os 12 indicadores hidrológicos correspondentes aos valores médios da vazão para cada mês com as seguintes influências nos ecossistemas:

- Disponibilidade de habitat para os organismos aquáticos;
- Disponibilidade de umidade do solo para as plantas;
- Disponibilidade de água e alimentos para os animais terrestres;
- Confiabilidade de abastecimento de água para população;
- Influência na temperatura da água e no nível de oxigênio;

Grupo 2: Magnitude e duração de condições extremas anuais.

O momento de ocorrência de determinadas condições da água (vazão) pode determinar o grau de estresse ou de mortalidade associada a condições extremas como enchentes ou secas. Os 12 indicadores descrevem a magnitude e duração anuais dos fluxos extremos, são índices de número de dias com vazão nula, escoamento de base, a máxima e a mínima vazão diárias, semanais, mensais e ciclos sazonais. As principais influências destas condições no ecossistema são:

- Criação de locais para a colonização de plantas ou redução da umidade do solo para as plantas;
- A desidratação nos animais ou influência para a reprodução de certas espécies;
- Distribuição de comunidades de plantas em lagos, lagoas, várzeas;
- Duração dos fluxos elevados para a eliminação de resíduos;
- Duração do nível de oxigênio inadequado;

Grupo 3: Tempo anual de condições extremas da água.

Os dois indicadores hidrológicos indicam o tempo anual de fluxo extremo (máximo e mínimo) para o calendário Juliano. O dia Juliano representa a ordem numérica do dia do ano, sendo assim, para o primeiro de janeiro, o dia Juliano é 1 e, para 31 de dezembro, o dia Juliano é 365 ou 366. O calendário destas ocorrências particulares sobre as condições da água pode determinar o ciclo de vida das espécies ou pode influenciar o grau de estresse ou mortalidade associada a condições extremas de água, tais como inundações ou secas.

Grupo 4: Frequência e duração de impulsos de alta e baixa.

Os quatro indicadores hidrológicos são referentes à frequência e duração dos impulsos de alta e baixa. Os impulsos de alta são períodos dentro de um ano quando os fluxos diários estão acima do percentual de 75% do período de pré-impacto. Já os impulsos baixos são períodos dentro de um ano quando o fluxo diário está abaixo do percentual de 25% do período de pré-impacto. Esses limites percentuais podem ser modificados dependendo das características do sistema hidrológico. Por intermédio da frequência e duração, podem-se gerar informações relevantes para o ecossistema, que podem estar ligadas à reprodução ou eventos de mortalidade para várias espécies, influenciando a população dinâmica.

Grupo 5: Taxa e frequência de mudanças de condições de água.

Os três indicadores (taxa de queda, taxa de aumento e número de reversões) indicam os números e as taxas médias de ambas as mudanças positivas e negativas de fluxo em dois dias consecutivos. A taxa de variação no estado da água pode estar ligada à capacidade de raízes de plantas de manter contato com o abastecimento de água do lençol freático.

Tabela 1. Parâmetros hidrológicos e as suas características utilizados no IHA [4].

Grupos	Característica	Parâmetros Hidrológicos
Grupo 1: Magnitude das vazões mensais.	Magnitude e tempo.	Vazão média mensal
Grupo 2: Magnitude e duração de vazões anuais extremas.	Magnitude e duração.	Vazão mínima diária Vazão máxima diária Vazão mínima de 3 dias Vazão máxima de 3 dias Vazão mínima de 7 dias Vazão máxima de 7 dias Vazão mínima de 30 dias Vazão máxima de 30 dias Vazão mínima de 90 dias Vazão máxima de 90 dias Número de dias com vazão nula Quociente entre a vazão mínima de sete dias e vazão média anual (escoamento de base)
Grupo 3: Época das vazões anuais extremas.	Tempo.	Dia Juliano da vazão máxima diária anual Dia Juliano da vazão mínima diária anual
Grupo 4: A frequência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas.	Magnitude, frequência e duração.	Número de eventos de alto pulso em cada ano. Número de eventos de baixo pulso em cada ano. A duração média dos eventos de alto pulso em cada ano. A duração média dos eventos de baixo em cada ano.
Grupo 5: Taxa e frequência de mudanças de condições de água (mudança no hidrograma).	Tempo e taxa de mudança	Médias de todas as diferenças positivas entre os valores diários consecutivos. Médias de todas as diferenças negativas entre os valores diários consecutivos. Número de reversões.

3.3 RANGE OF VARIABILITY APPROACH (RVA)

O Range of Variability Approach (RVA) é uma abordagem para gestão do ecossistema definida pela vazão do rio. O método destina-se à aplicação em rios para conservação da biodiversidade aquática nativa e proteção das funções dos ecossistemas naturais. Com base no paradigma de manutenção do regime hidrológico natural, o RVA utiliza os 33 indicadores hidrológicos (IHA) para avaliar as alterações hidrológicas considerando um regime de variação admissível [6]. O método RVA utiliza a média \pm um desvio padrão para definir o limite da faixa de variação para uma análise paramétrica, ou a mediana e os valores para os percentis de 25% e 75%. Outros limites podem ser escolhidos para vazões ecológicas conhecidas ou vazões extremas, dependendo das características de cada Sistema, podendo ser diferente nos vários parâmetros do IHA [6,34].

A medida para o fator de alteração hidrológica é definida por:

$$HA = ((\textit{Frequência Observada} - \textit{Frequência esperada}) / \textit{Frequência esperada})$$

Onde, *Frequência esperada* é a frequência dos valores anuais da vazão encontrados na faixa do RVA correspondente aos dados no período pré-impacto; *Frequência Observada* é a frequência dos valores anuais da vazão encontrados na faixa do RVA correspondente aos dados do período pós-impacto.

O fator alteração hidrológica (HA) é igual a zero quando a frequência observada dos valores anuais de pós-impacto é igual à frequência esperada dos valores pré-impacto e possuem comportamentos semelhantes na mesma faixa RVA. O HA positivo indica que a frequência dos valores anuais de pós-impacto é maior que a frequência esperada no período pré-impacto; O HA negativo indica que a frequência dos valores anuais de pós-impacto é menor que a frequência esperada no período pré-impacto [6]. Para cada faixa do RVA, é calculado o fator de alteração hidrológica (HA) correspondente. Atualmente, estão sendo realizados estudos para aperfeiçoar o fator de alteração hidrológica (HA) e determinar melhores critérios para verificar o impacto ambiental após construção do reservatório [35].

3.4 DISTÂNCIA DE CANBERRA

Dados dois vetores de valores reais x e $y \in \mathbb{R}^n$, a distância de Canberra [36] é uma métrica calculada pela soma das diferenças fracionárias entre as coordenadas de pares de objetos. A fórmula da distância de Canberra é dada pela equação:

$$d(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{|x_i| + |y_i|} \quad (1)$$

Se uma das coordenadas dos vetores for igual à zero, o termo se torna igual a 1. Em todos os outros casos, o termo pertence ao intervalo $[0,1]$. O somatório total pertence ao intervalo $[0,n]$, onde n é a dimensão dos vetores.

É uma métrica com bom comportamento para os dados próximos da origem quando o conjunto possui diversas características, e é bastante utilizada em análise multivariada como medida de dissimilaridades e também na área biológica [37,38].

Definimos cada termo da distância de Canberra como um fator de alteração hidrológica para cada indicador do IHA nas faixas do RVA para apontar as possíveis alterações hidrológicas após a construção dos reservatórios.

$$HA_C = \frac{x_i - y_i}{x_i + y_i} \quad (2)$$

Onde x_i é a frequência observada dos valores anuais da vazão encontrados na faixa do RVA correspondente aos dados após a construção dos reservatórios, pós-impacto; y_i é a frequência esperada dos valores anuais da vazão encontrados na faixa do RVA correspondente aos dados antes da construção dos reservatórios, pré-impacto.

O fator alteração hidrológica (HA_C) pertence ao intervalo $[-1,1)$. O HA_C é igual a -1 quando a frequência observada dos valores anuais de pós-impacto é nula; o HA_C é igual a zero quando a frequência observada dos valores anuais de pós-impacto é igual à frequência esperada pré-impacto e tem comportamentos semelhantes na mesma faixa RVA; o HA_C positivo indica que a frequência dos valores anuais de pós-impacto é maior que a frequência

esperada no período pré-impacto; o HA_C negativo indica que a frequência dos valores anuais de pós-impacto é menor que a frequência esperada no período pré-impacto. Para cada faixa do RVA é calculado o fator de alteração hidrológica (HA_C) correspondente.

Aplicando-se critérios matemáticos na interpretação do fator de alteração hidrológica (HA_C), temos que: quando $HA_C > 0,33$ a frequência observada é maior que o dobro da frequência esperada; quando $HA_C < -0,33$, a frequência esperada é maior que o dobro da frequência observada. Como cada HA_C é um termo da distância de Canberra, então a distância de Canberra é a soma dos valores absolutos dos HA_C para os 33 indicadores hidrológicos do IHA e foi utilizada como uma métrica de comparação absoluta das alterações hidrológicas entre as bacias hidrográficas.

3.5 METODOLOGIA

Os métodos utilizados para investigar as alterações hidrológicas nas bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari, após construções do Sistema Cantareira, foram os Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) e Range of Variability Approach (RVA). Inicialmente, o conjunto de dados foi separado em dois períodos, antes (pré-impacto) e depois (pós-impacto) da construção dos reservatórios do Sistema Cantareira. Estas informações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Conjunto de dados das vazões diárias das sub-bacias do rio Piracicaba.

Bacia	Prefixo	Pré-impacto	Pós-impacto	Área (km ²)
Jaguari	3D-009	01/10/1930 – 30/09/1980	01/10/1984 – 30/09/1998	1950,00
Atibaia	3D-006	01/10/1930 – 30/09/1975	01/10/1975 – 30/09/1996	1920,00

O comportamento das vazões foi avaliado pelo método IHA e os 33 indicadores ecologicamente relevantes foram calculados e devidamente separados nos cinco grupos para caracterizar estatisticamente a variação hidrológica. Os limites do RVA foram definidos para análise não paramétrica e limitando as categorias em ± 17 percentil da mediana. Isso gera uma delimitação de três categorias do mesmo tamanho: a categoria do limite inferior (RVA Inf) contém todos os valores menores ou iguais ao percentil 33, a categoria central (RVA) contém todos os valores entre os percentis 34 e 67 e a categoria do limite superior (RVA Sup) contém todos os valores maiores que o percentil 67. Os fatores de alterações

hidrológicas (HA) foram calculados para todos os 33 parâmetros IHA nas três categorias do RVA para as duas sub-bacias hidrográficas pertencente a bacia hidrográfica do rio Piracicaba (Atibaia e Jaguari) e comparados com os fatores hidrológicos para os limites do RVA nas categorias em ± 25 percentil da mediana. Todas as análises foram realizadas no software IHA -*Indicators of Hydrologic Alteration*, versão 7.1.0.10, <<https://www.conservationgateway.org/>>.

Com objetivo de contribuir com os estudos recentes, procurando aperfeiçoar o fator de alteração hidrológica (HA) [35] e determinar melhores critérios para verificar o impacto ambiental após a construção dos reservatórios, neste trabalho avaliou-se o uso do termo da distância de Canberra como uma alternativa para mensurar o fator de alterações hidrológicas para os 33 indicadores do IHA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alterações hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

A Figura 4 representa o gráfico do comportamento da vazão diária da bacia hidrográfica do rio Atibaia no período de 01/10/1930 a 30/09/1996. A Tabela 3 mostra as estatísticas descritivas: mediana, coeficiente de variação (CV), mínimo e máximo dos parâmetros do IHA para os períodos antes e depois da construção do reservatório. Os fatores de maior alteração hidrológica da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira são número de baixo pulso, máximo de diário, vazão mensal de maio e duração de alto pulso quando se consideram todos os 33 parâmetros para os limites do RVA ± 17 percentis da mediana e ± 25 percentis da mediana mostrados nas Tabelas 4 e 5. Não existe uma diferença significativa nos fatores de alteração hidrológica para os diferentes limites do RVA, como pode ser visto na Figura 5.

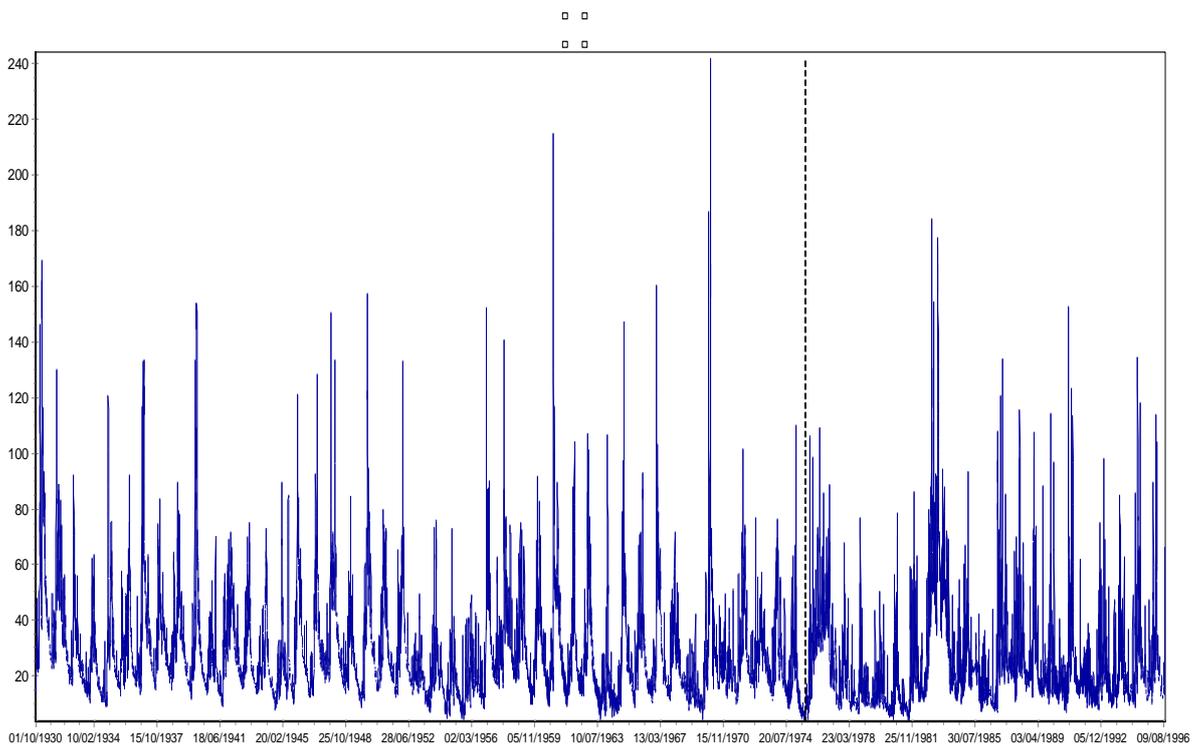


Figura 4. Série temporal da vazão diária da bacia hidrográfica do rio Atibaia para períodos antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira (períodos divididos pela linha tracejada).

Tabela 3. Estatística descritiva dos 33 indicadores IHA da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

Grupos IHA	Período Pré – impacto: 1931 – 1975 (44 anos)				Período Pós – impacto: 1976 – 1996 (20 anos)			
	Mediana	Mínimo	Máximo	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	CV
<u>Grupo 1</u>								
Janeiro	43,69	11,16	89,66	0,58	27,47	10,48	57,22	0,70
Fevereiro	48,18	17,27	117,2	0,44	30,44	13,55	70,26	0,76
Março	40,94	14,32	85,21	0,64	26,74	11,37	61,99	0,57
Abril	31,23	12,06	58,22	0,43	19,34	8,94	56,62	0,56
Maio	23,48	9,30	44,85	0,39	17,40	8,15	43,20	0,67
Junho	20,67	7,18	40,42	0,33	15,78	8,80	132,5	0,76
Julho	18,42	7,27	29,72	0,32	14,50	8,73	63,40	0,51
Agosto	16,94	5,04	24,93	0,31	13,15	7,72	37,59	0,60
Setembro	15,76	7,67	31,97	0,37	15,99	4,96	63,41	0,59
Outubro	17,91	8,45	43,69	0,46	17,40	7,00	53,76	0,60
Novembro	21,60	8,98	38,65	0,50	17,51	9,88	50,73	0,59
Dezembro	29,47	15,13	70,36	0,57	20,90	13,08	57,07	0,68
<u>Grupo 2</u>								
Mínimo 1-dia	10,05	3,48	18,13	0,52	7,86	3,79	12,55	0,53
Mínimo 3-dia	10,94	4,15	18,29	0,42	8,27	3,83	15,99	0,60
Mínimo 7-dia	11,78	4,50	18,82	0,39	9,31	4,16	17,71	0,58
Mínimo 30-dia	14,66	5,10	24,26	0,34	12,30	5,23	27,15	0,37
Mínimo 90-dia	17,15	6,57	28,88	0,30	15,00	7,26	39,23	0,37
Máximo 1-dia	92,08	42,18	241,80	0,63	93,60	43,90	184,4	0,40
Máximo 3-dia	88,83	38,56	227,70	0,67	80,31	42,23	167,30	0,49
Máximo 7-dia	79,55	33,65	198,90	0,65	68,49	35,68	163,90	0,54
Máximo 30-dia	59,71	22,15	128,2	0,46	48,15	22,37	129,20	0,48
Máximo 90-dia	49,26	19,66	96,47	0,47	36,04	19,16	83,09	0,60
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0
Escoamento de base	0,42	0,23	0,54	0,29	0,41	0,17	0,62	0,44
<u>Grupo 3</u>								
Dia Juliano mínimo	274	153	343	0,06	301	50	358	0,20
Dia Juliano máximo	33	8	362	0,13	28	3	358	0,17
<u>Grupo 4</u>								
Número de baixo pulso	8	0	25	0,50	13	1	33	0,69
Duração de baixo pulso	4,75	1	20	1,03	5	1	14	1,4
Número de alto pulso	6	1	13	0,67	10	3	17	0,55
Duração de alto pulso	6	1	55	0,92	3,5	2	7	0,57
<u>Grupo 5</u>								
Taxa de crescimento	1,44	0,75	2,46	0,41	1,99	0,97	3,71	0,49
Taxa de queda	-1,14	-2	-0,79	-0,43	-1,48	-3,66	-0,75	-0,56
Número de reversão	122	92	177	0,16	142	86	188	0,19

Tabela 4. Limites RVA \pm 17 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológica (HA)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	33,11	51,17	0,14	0	-0,29
Fevereiro	39,10	53,41	0,86	-0,57	-0,57
Março	33,17	53,91	1,14	-0,29	-0,43
Abril	26,68	35,22	0,71	-0,57	-0,71
Mai	21,54	27,70	1,28	-0,86	-0,71
Junho	19,09	23,64	1,00	-0,43	-0,71
Julho	16,94	21,13	1,29	-0,43	-0,71
Agosto	15,32	18,10	1,14	-0,43	-0,29
Setembro	13,93	17,27	0,71	-0,57	-0,29
Outubro	15,58	22,15	0,86	0,14	-0,43
Novembro	19,96	25,63	0,71	-0,29	-0,29
Dezembro	24,23	35,58	0,29	-0,60	-0,29
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	8,52	12,46	0,86	0	-0,86
Mínimo 3-dia	9,96	13,01	1,00	-0,15	-0,86
Mínimo 7-dia	10,54	13,67	0,86	-0,15	-0,71
Mínimo 30-dia	12,03	15,58	0,43	0,15	-0,57
Mínimo 90-dia	15,83	18,95	0,71	-0,15	-0,57
Máximo 1-dia	77,32	121,00	-0,29	0,71	-0,43
Máximo 3-dia	74,06	117,60	-0,15	0,57	-0,43
Máximo 7-dia	68,54	106,60	0,57	0	-0,57
Máximo 30-dia	52,51	71,02	0,86	0	-0,86
Máximo 90-dia	43,24	57,71	0,57	0,29	-0,86
Número de vazão nula	0	0	0	0	0
Escoamento de base	0,38	0,45	0,14	-0,29	0,14
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	266,20	277	-0,29	-0,73	1,14
Dia Juliano máximo	38,08	74,46	0,43	-0,57	0,14
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	7	9	-0,54	-0,66	1,68
Duração de baixo pulso	3	7	0,36	-0,14	-0,01
Número de alto pulso	5	7,82	-0,23	-0,60	0,86
Duração de alto pulso	5	8,41	1,45	-0,33	-1,00
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,30	1,60	-0,43	-0,57	1,00
Taxa de queda	-1,29	-1,01	1,00	-0,71	-0,29
Número de reversão	116,20	131,60	-0,57	-0,57	1,14

Tabela 5. Limites RVA \pm 25 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológica (HA) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológica (HA)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	28,59	53,96	1,20	-0,20	-0,60
Fevereiro	34,12	55,24	1,60	-0,40	-0,60
Março	29,48	55,83	1,60	-0,40	-0,60
Abril	22,93	36,26	1,60	-0,40	-0,60
Mai	19,86	28,97	1,80	-0,60	-0,40
Junho	18,18	25,08	1,40	-0,60	0,00
Julho	16,46	22,26	1,60	-0,40	-0,60
Agosto	13,47	18,77	1,20	-0,50	0,00
Setembro	12,89	18,68	0,20	-0,30	0,60
Outubro	14,81	23,02	0,60	-0,10	-0,20
Novembro	17,38	28,07	0,80	0,00	-0,60
Dezembro	22,13	38,99	1,60	-0,60	-0,20
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	8,08	13,29	1,20	0,00	-1,00
Mínimo 3-dia	9,137	13,73	1,40	-0,20	-0,80
Mínimo 7-dia	9,843	14,47	1,40	-0,30	-0,60
Mínimo 30-dia	11,41	16,46	0,80	0,00	-0,60
Mínimo 90-dia	14,36	19,58	0,60	0,00	-0,40
Máximo 1-dia	75,04	133,3	-0,20	0,70	-0,20
Máximo 3-dia	69,95	129,8	0,00	0,30	-0,40
Máximo 7-dia	64,43	116,2	0,40	0,20	-0,60
Máximo 30-dia	49,51	77,15	1,20	-0,10	-0,80
Máximo 90-dia	38,11	61,23	1,20	-0,10	-0,80
Número de vazão nula	0	0	0,00	0,00	0,00
Escoamento de base	0,3476	0,468	0,40	-0,30	0,40
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	260	283	-0,20	-0,50	1,40
Dia Juliano máximo	13	60	-0,40	-0,20	1,00
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	6	10	-0,40	-0,70	2,00
Duração de baixo pulso	2,625	7,5	0,40	-0,20	0,20
Número de alto pulso	4	8	0,00	-0,70	1,60
Duração de alto pulso	4	9,5	2,00	-0,40	-1,00
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,24	1,825	-0,40	-0,40	1,40
Taxa de queda	-1,455	-0,97	1,40	-0,60	0,00
Número de reversão	115	134,5	-0,60	-0,40	1,60

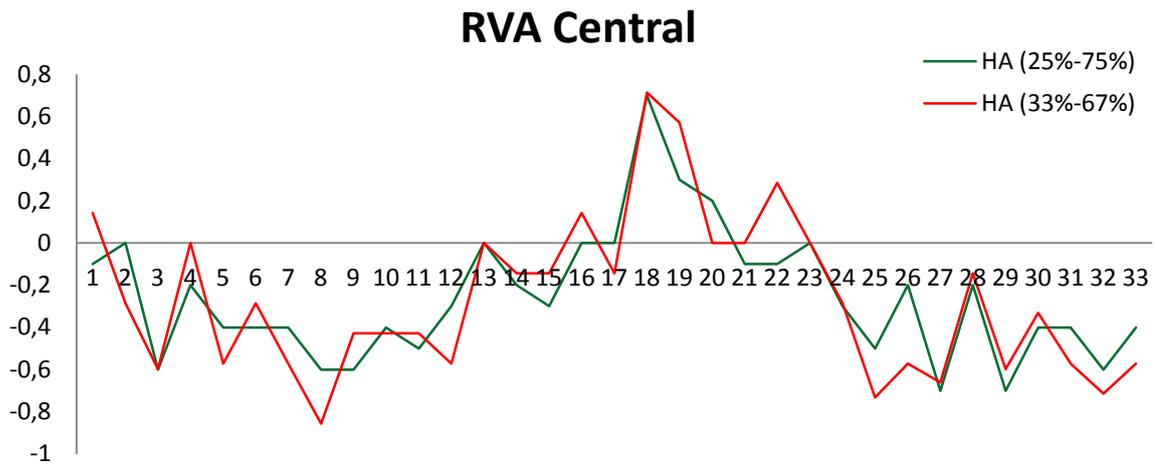


Figura 5. Fatores de alteração hidrológica HA (25% - 75%) x HA (33% - 67%) da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA central.

Grupo 1

Os coeficientes de variação para o período pós-impacto são maiores do que no período pré-impacto, indicando maiores flutuações mensal das vazões no período pós-impacto devido à construção do reservatório. Já as medianas das vazões mensais pós-impacto indicam uma tendência decrescente significativa em comparação com o período pré-impacto, exceto nos meses de setembro e outubro, em que pertencem ao intervalo interquartil do período pré-impacto, indicando que as menores medianas das vazões estão no período que marca o fim e o início do ano hidrológico da região sudeste[14], como ilustra a Figura 6.

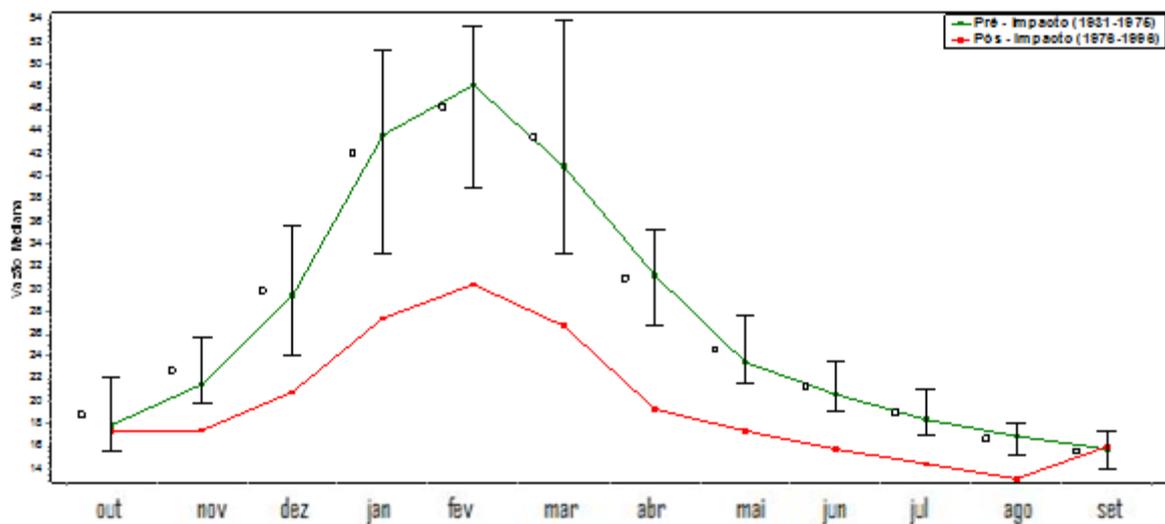


Figura 6. Alteração da distribuição sazonal das vazões mensais da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

As Figuras 7-18 mostram os gráficos dos 12 parâmetros do grupo 1 e representam as distribuições das medianas das vazões mensais para todos os anos. Nota-se que alguns anos destacam-se com as medianas das vazões mensais elevadas, o que se pode justificar pela ocorrência do El Niño, como, por exemplo, o ano de 1983 houve uma forte intensidade do El Niño [44,45] e o rio Piracicaba teve sua maior vazão anual de $350\text{m}^3\text{s}^{-1}$ da história [9]. As possíveis influências no ecossistema seriam na disponibilidade de habitat para os organismos aquáticos, umidade do solo para as plantas, água e alimentos para os animais terrestres, confiabilidade de abastecimento de água para população e influência na temperatura da água e no nível de oxigênio [4,6].

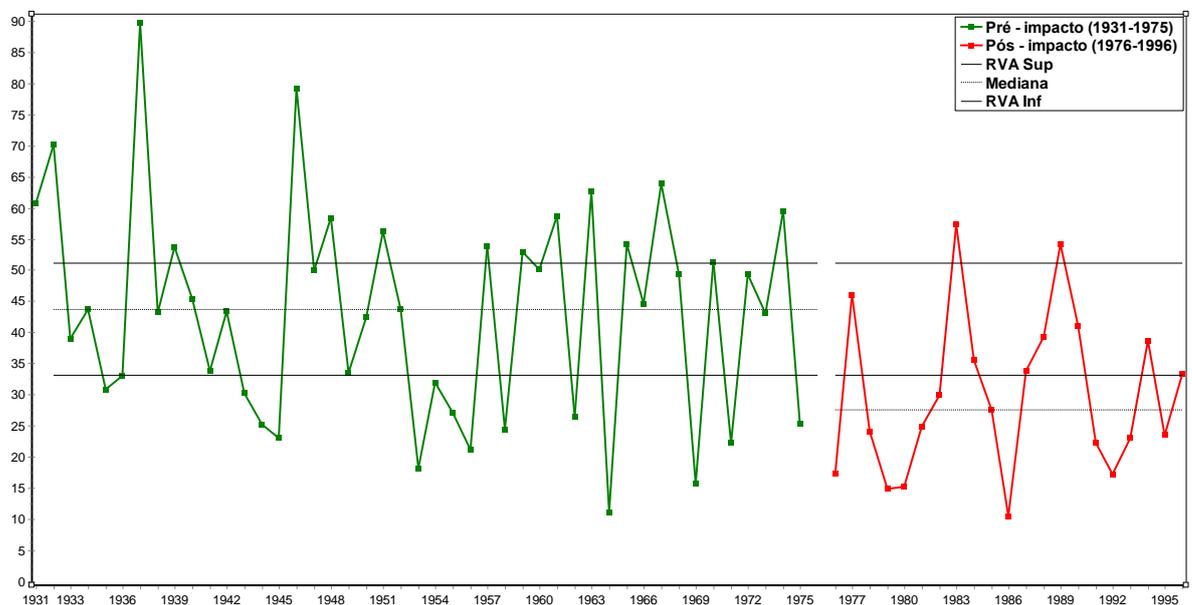


Figura 7. Série temporal da vazão mensal de janeiro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

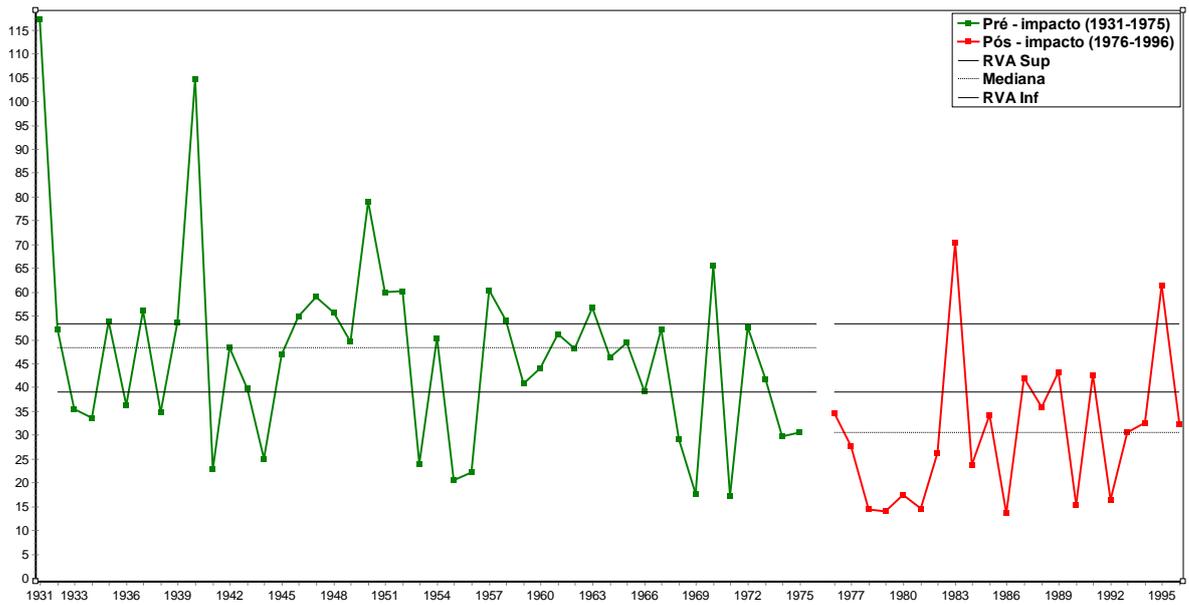


Figura 8. Série temporal da vazão mensal de fevereiro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

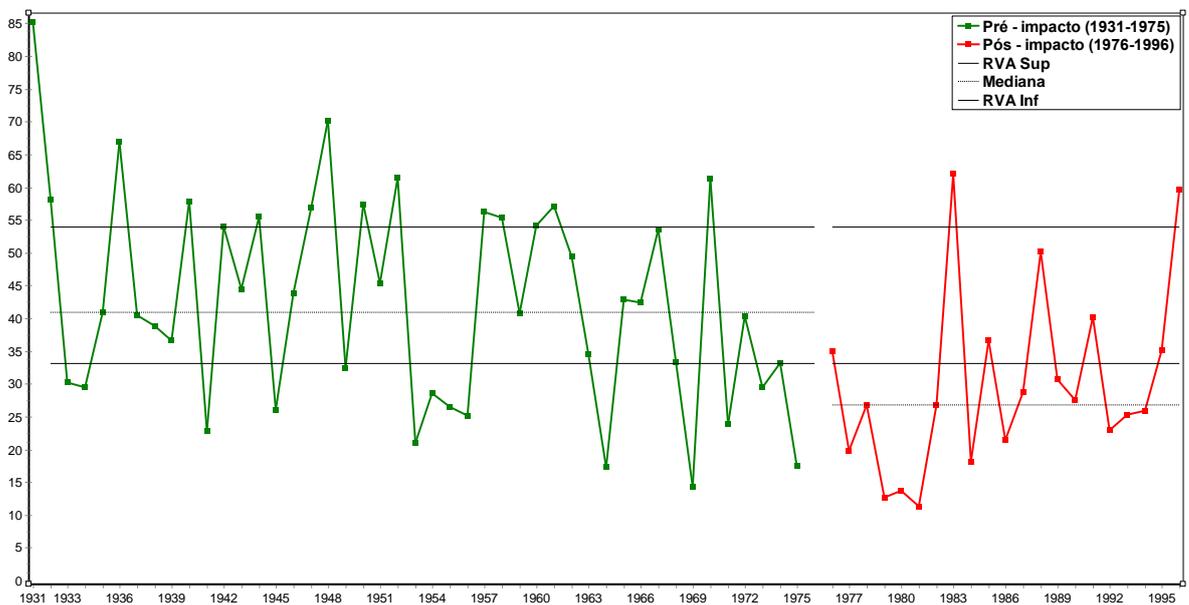


Figura 9. Série temporal da vazão mensal de março da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

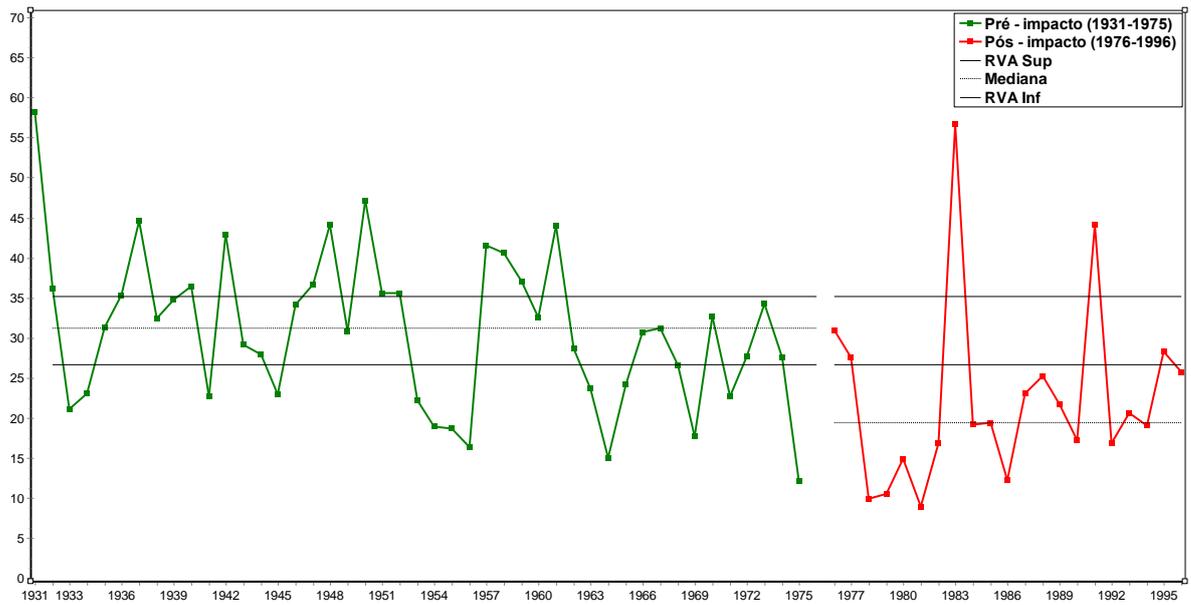


Figura 10. Série temporal da vazão mensal de abril da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

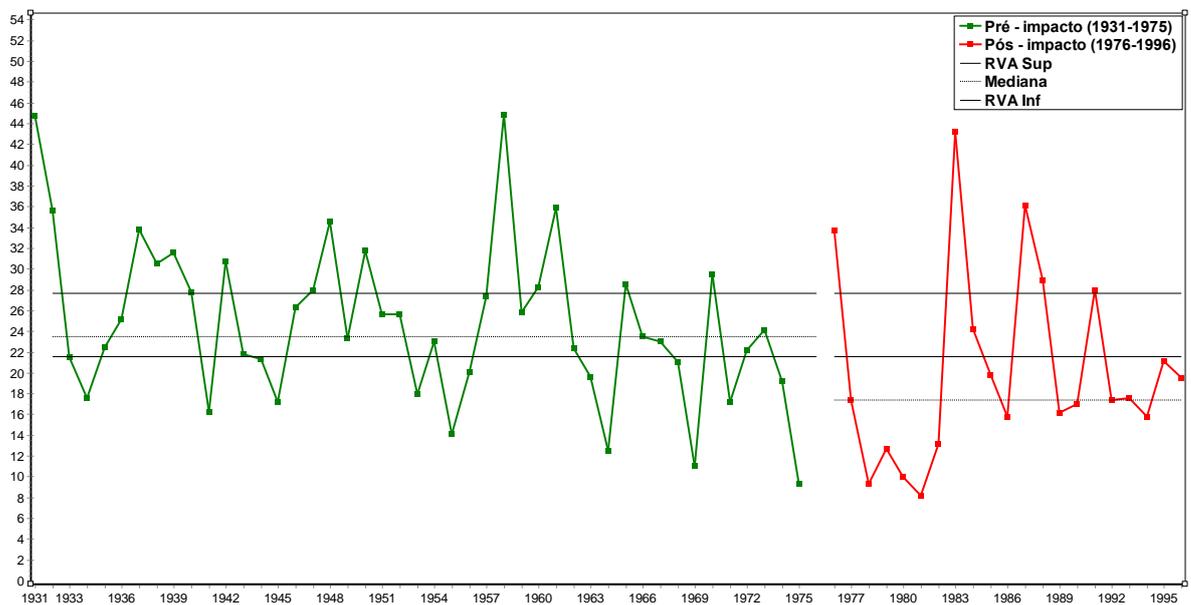


Figura 11. Série temporal da vazão mensal de maio da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

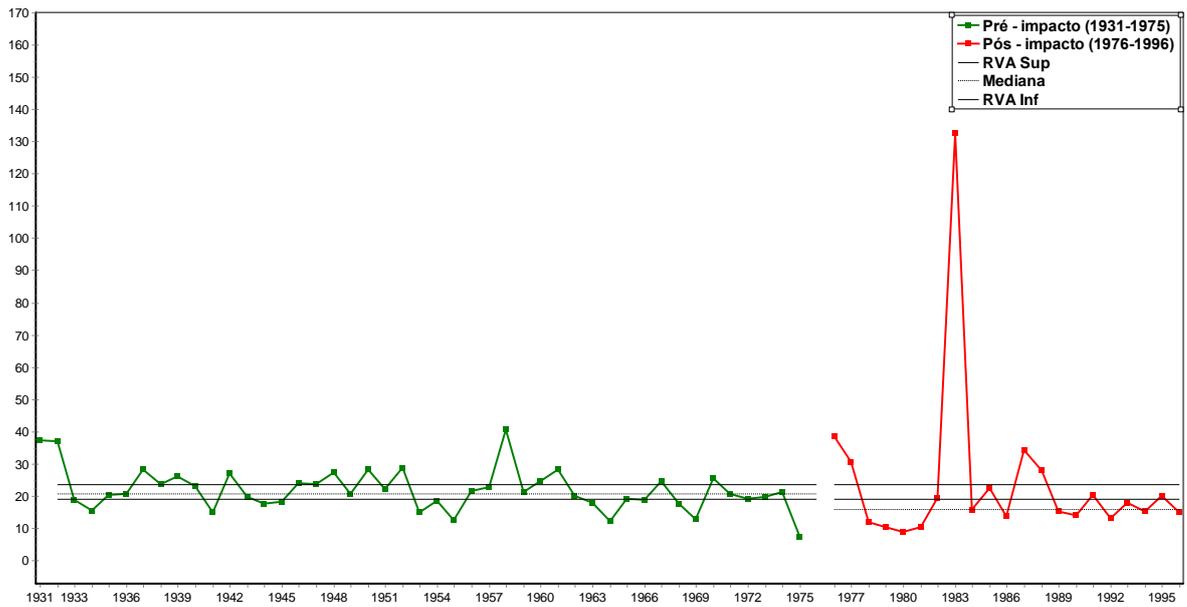


Figura 12. Série temporal da vazão mensal de junho da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

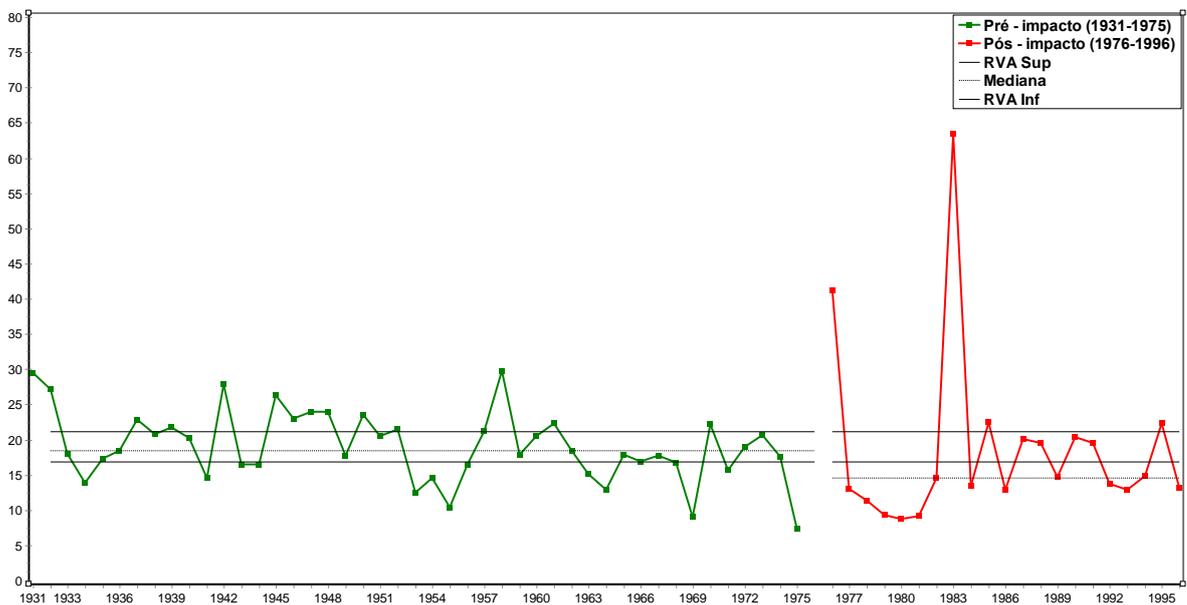


Figura 13. Série temporal da vazão mensal de julho da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

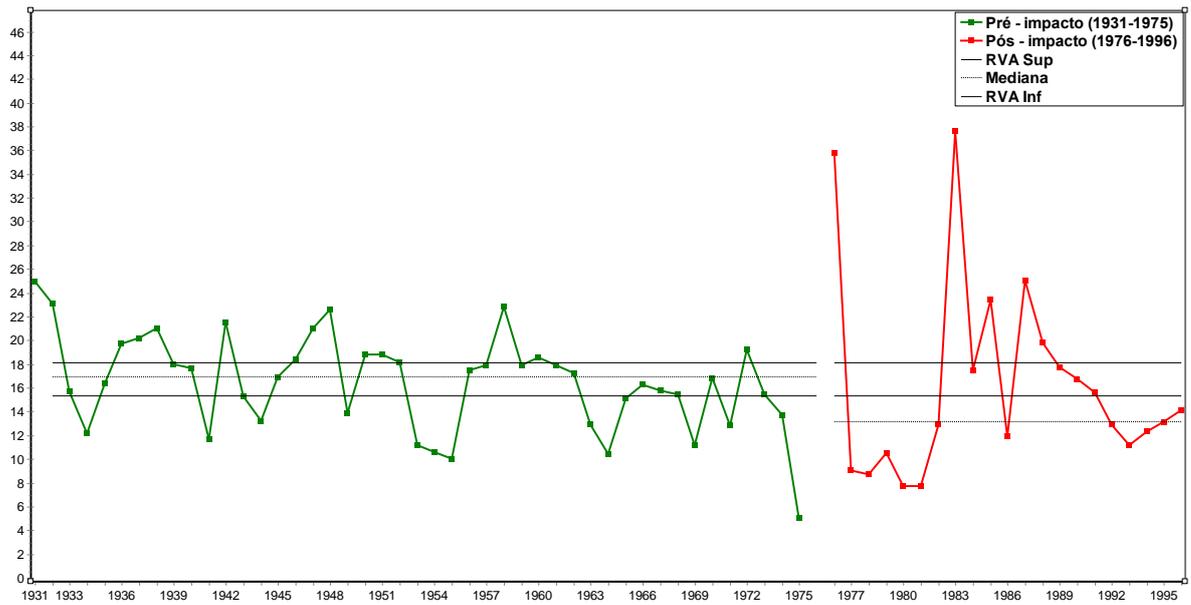


Figura 14. Série temporal da vazão mensal de agosto da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

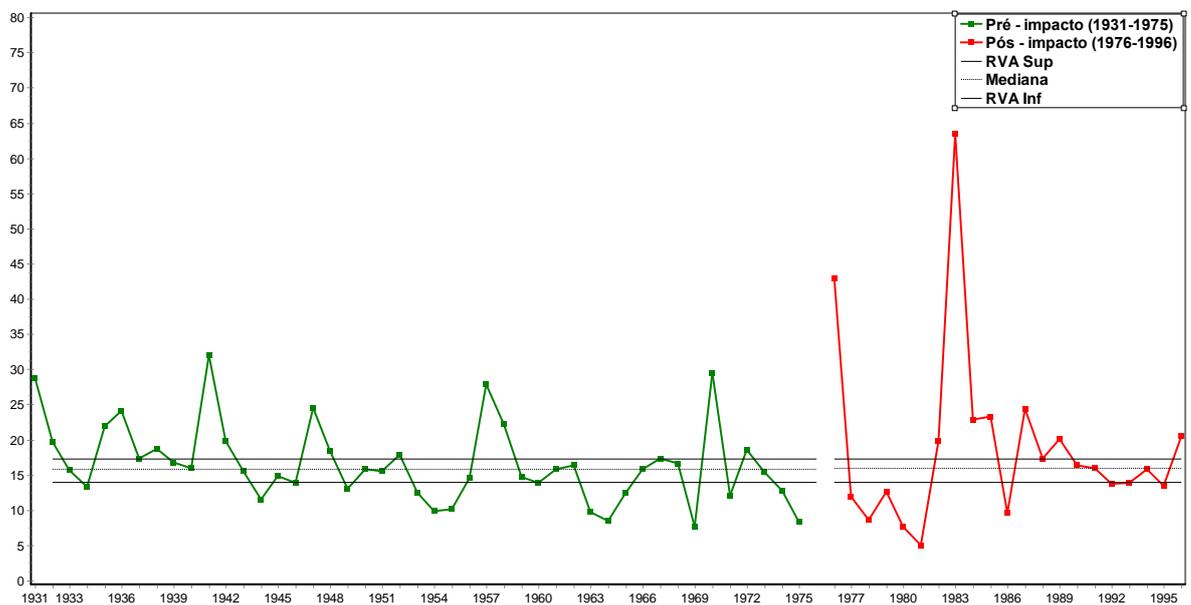


Figura 15. Série temporal da vazão mensal de setembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

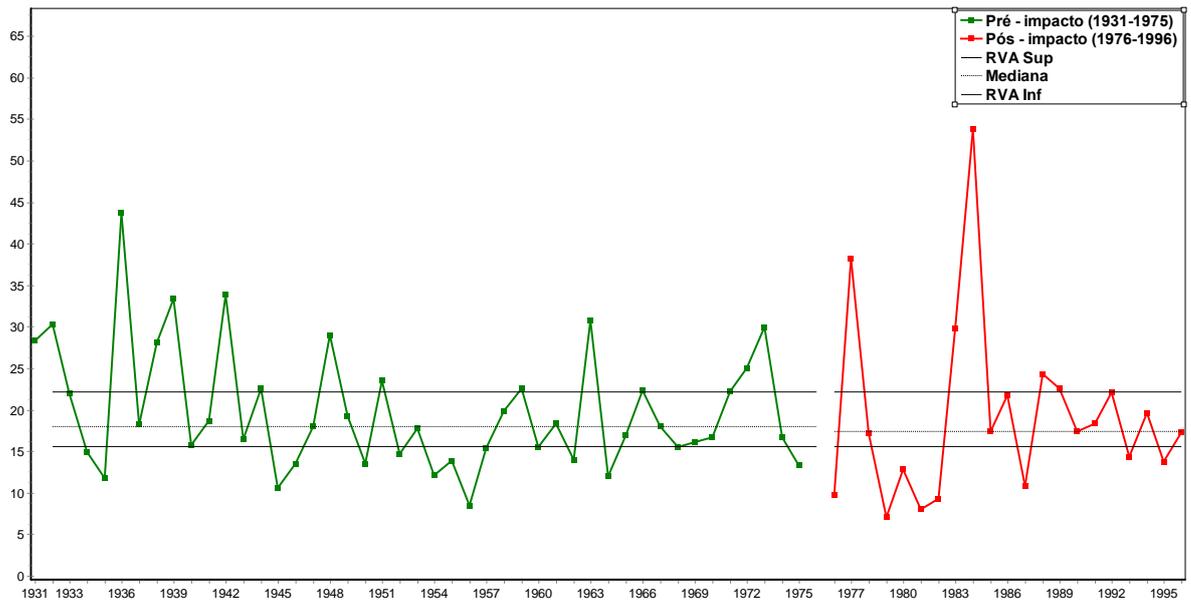


Figura 16. Série temporal da vazão mensal de outubro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

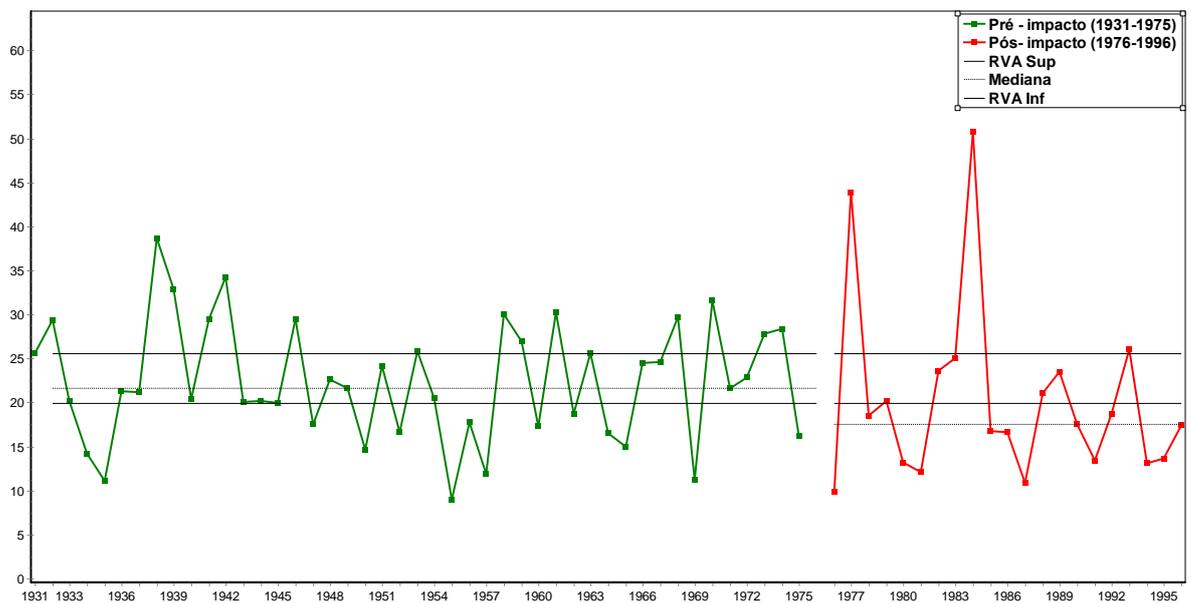


Figura 17. Série temporal da vazão mensal de novembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

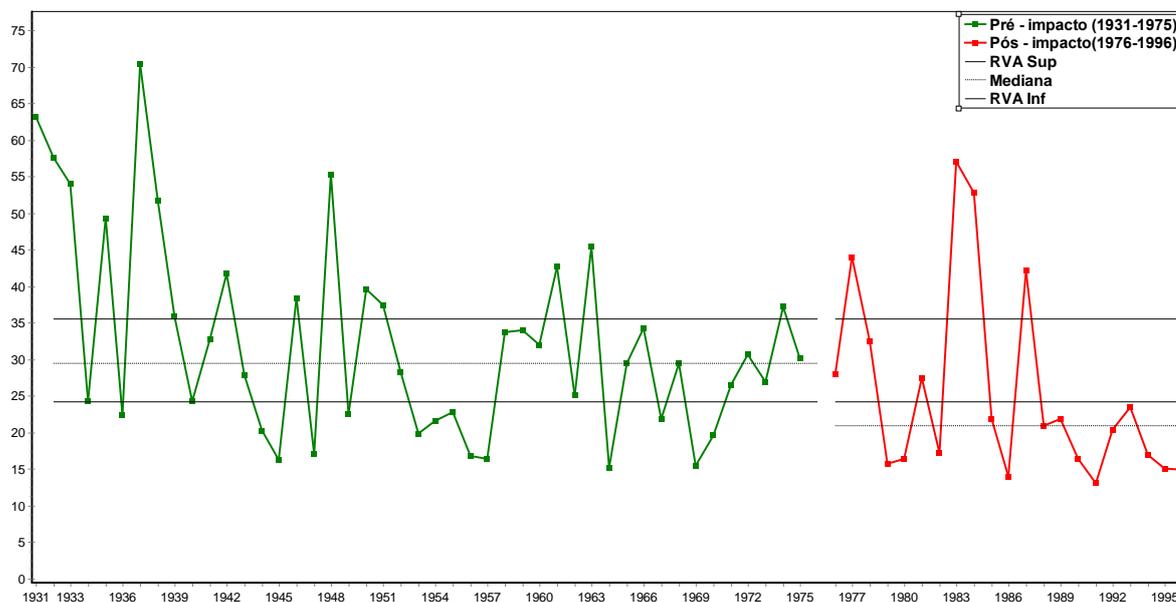


Figura 18. Série temporal da vazão mensal de dezembro da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 2

Os resultados dos parâmetros do grupo 2 indicam que os ciclos da vazão mínima e máxima, diária, semanal, mensal e trimestral são influenciadas negativamente pela construção do reservatório, como mostram as Figuras 19-28. As medianas anuais das vazões mínima e máxima (diária, semanal, mensal e trimestral) no período pós-impacto diminuem significativamente e os coeficientes de variação permaneceram com mesmo comportamento. Destacam-se com valores mais elevados as vazões mínimas mensais e trimestrais do ano de 1983, quando houve uma forte ocorrência do El Niño, já para as vazões máximas diárias e semanais mais elevadas ocorreram nos anos 1970 e 1983, justificadas pela presença do El Niño, moderada e forte, respectivamente [44,45]. As principais influências no ecossistema, possivelmente, seriam a criação de locais para a colonização de plantas ou redução da umidade do solo para as plantas, desidratação nos animais ou influência para a reprodução de certas espécies, distribuição de comunidades de plantas em lagos, várzeas, duração dos fluxos elevados para a eliminação de resíduos, duração do nível de oxigênio inadequado [4,6].

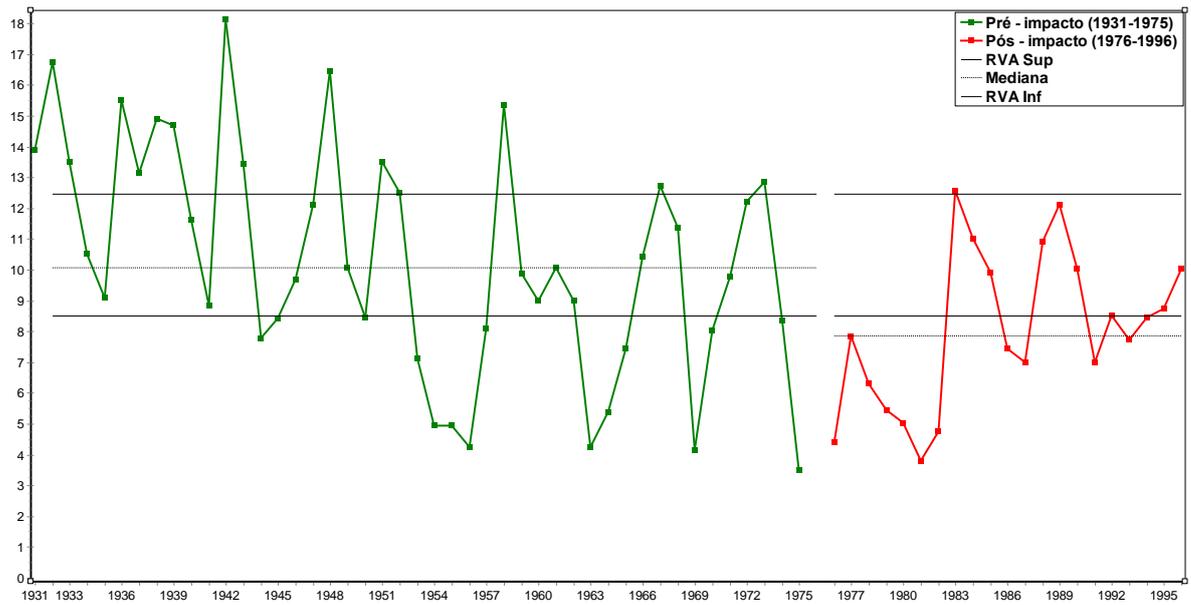


Figura 19. Série temporal da vazão mínima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

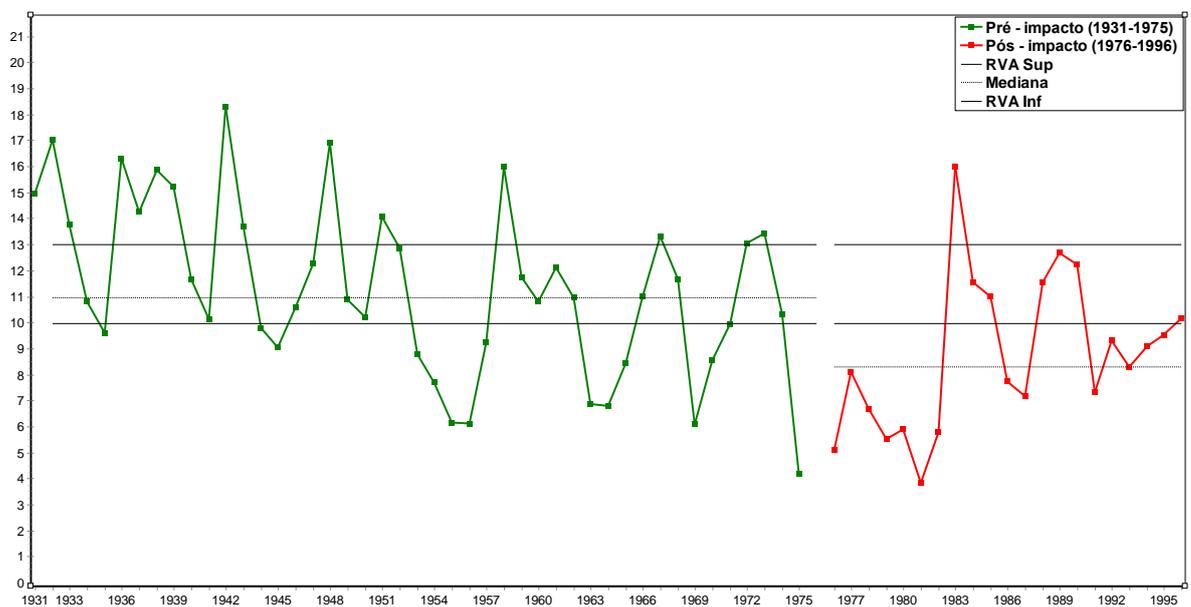


Figura 20. Série temporal da vazão mínima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

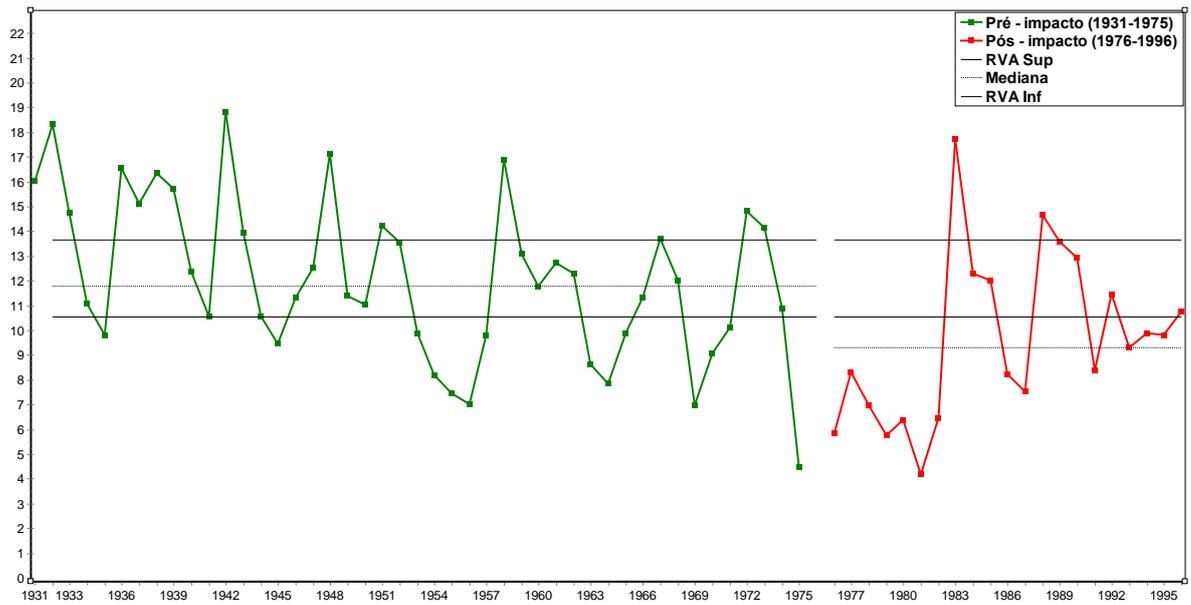


Figura 21. Série temporal da vazão mínima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

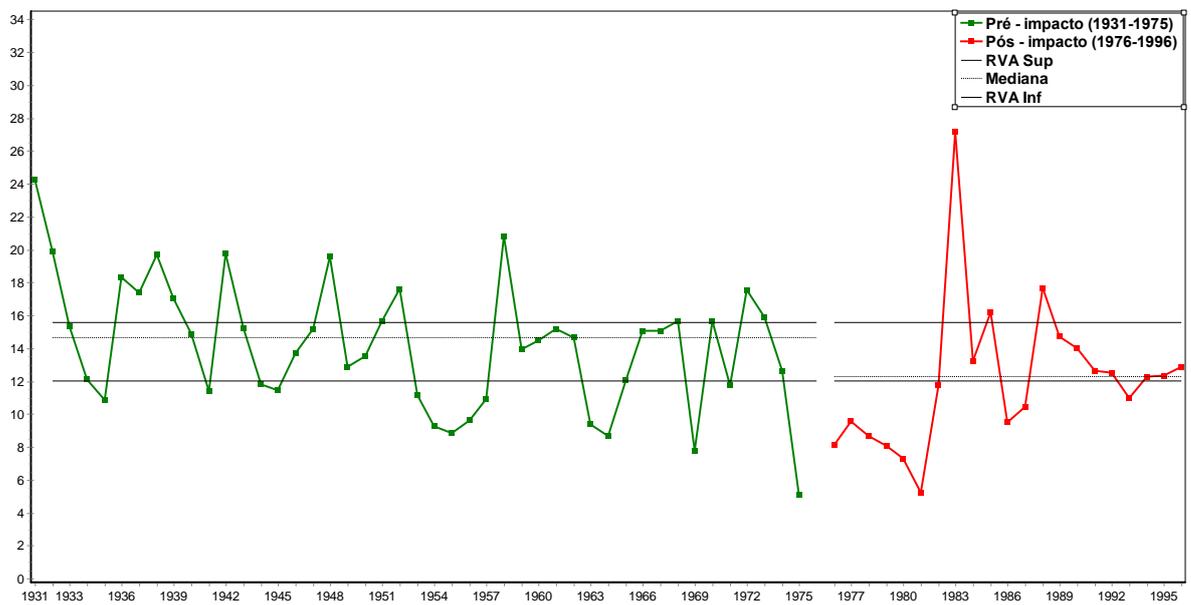


Figura 22. Série temporal da vazão mínima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

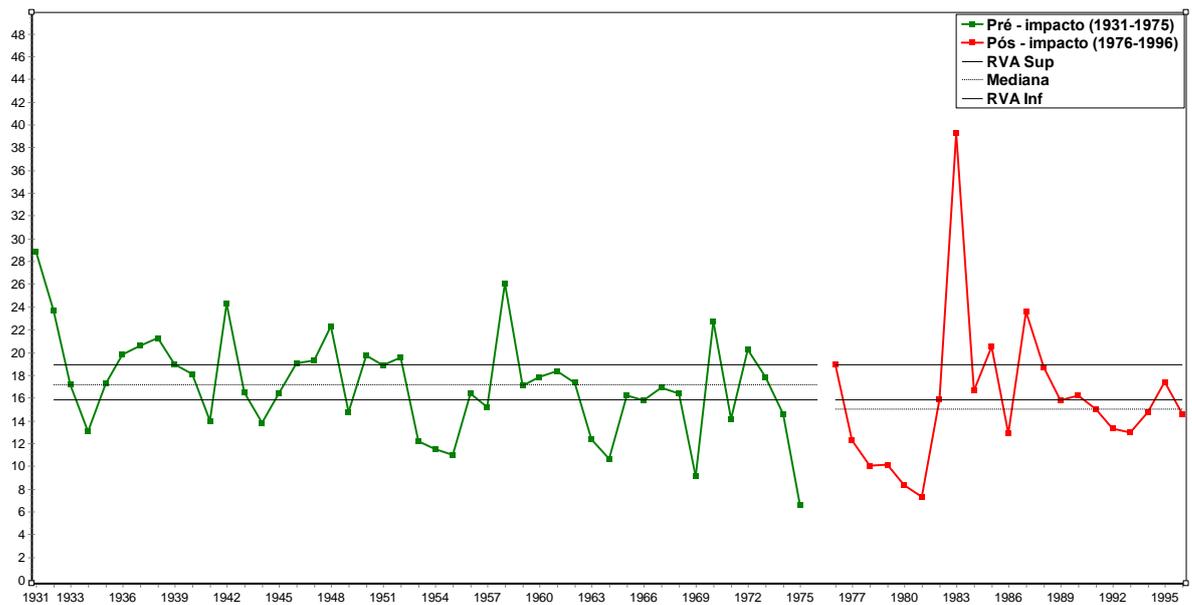


Figura 23. Série temporal da vazão mínima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

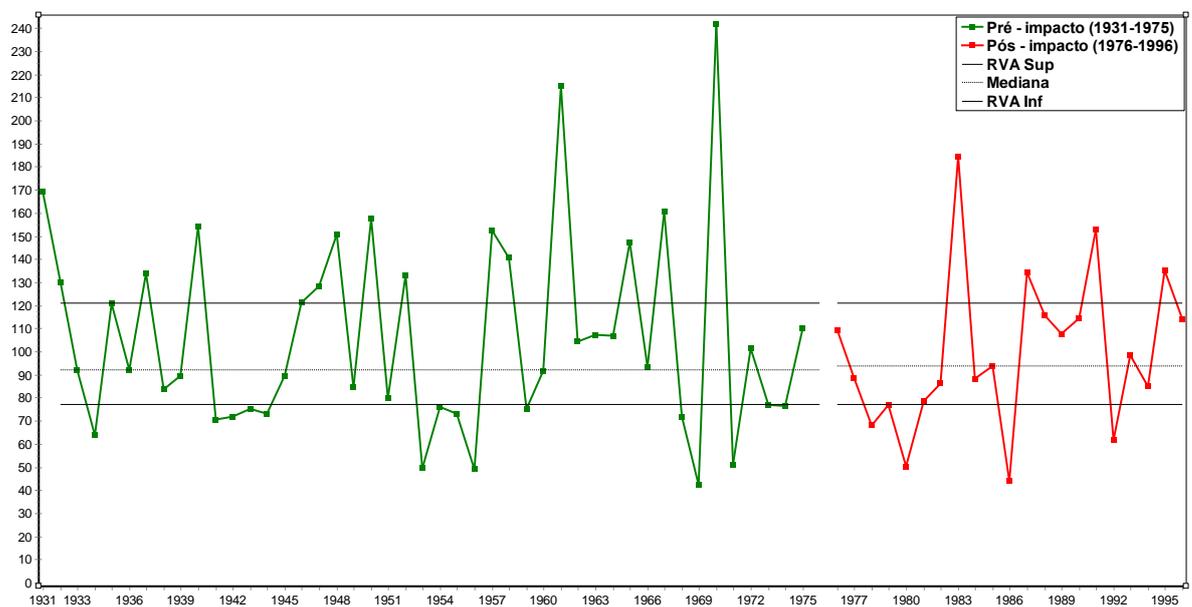


Figura 24. Série temporal da vazão máxima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

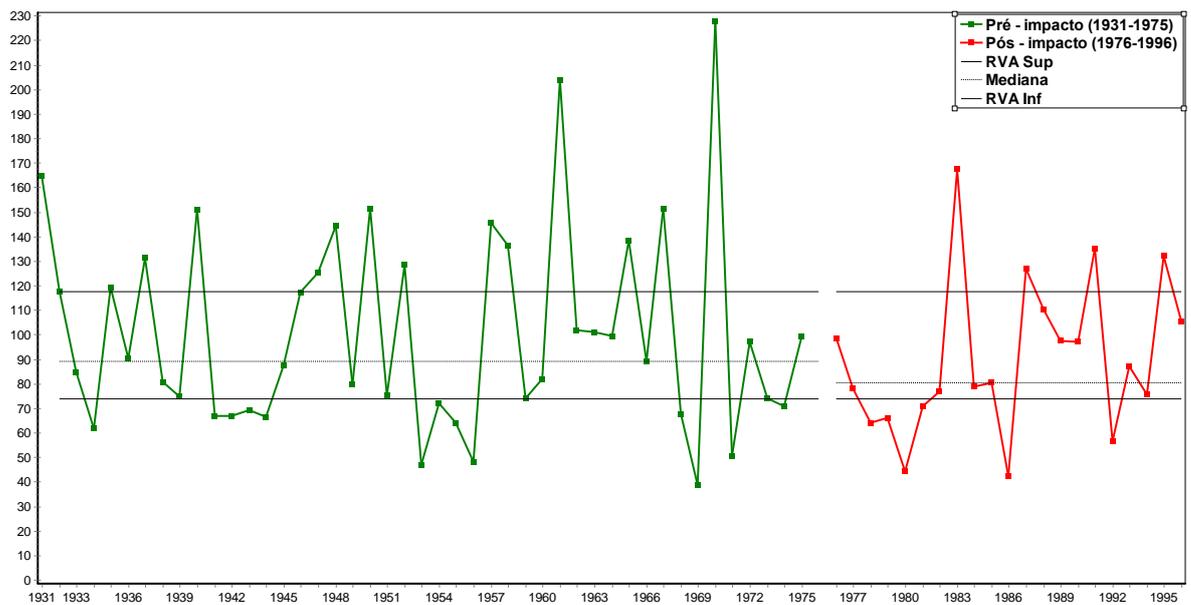


Figura 25. Série temporal da vazão máxima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

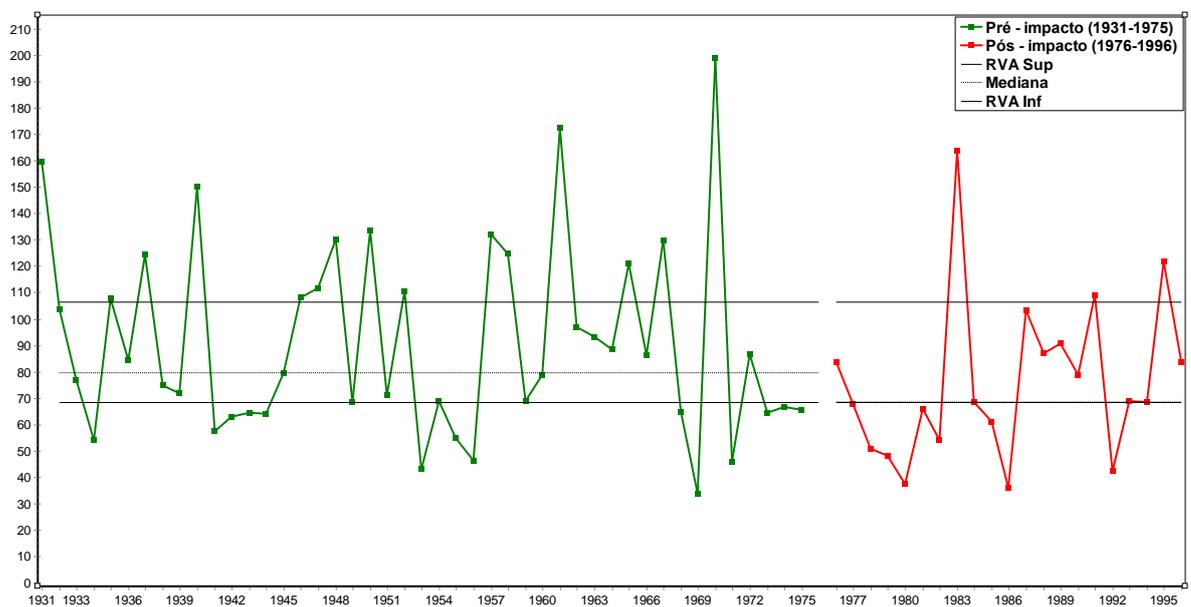


Figura 26. Série temporal da vazão máxima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

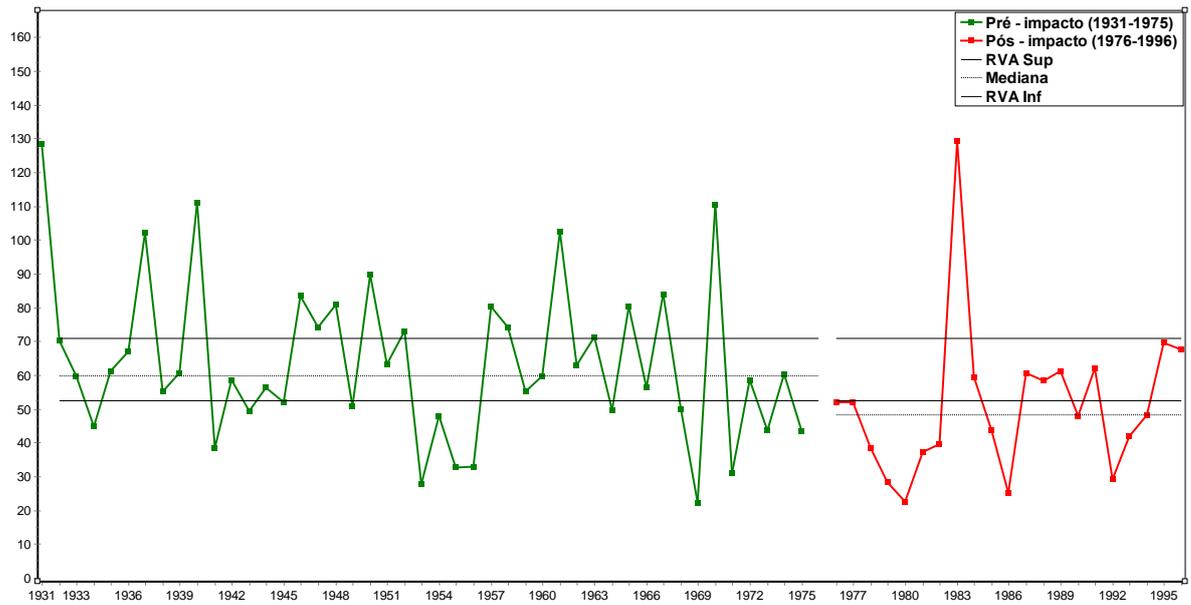


Figura 27. Série temporal da vazão máxima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

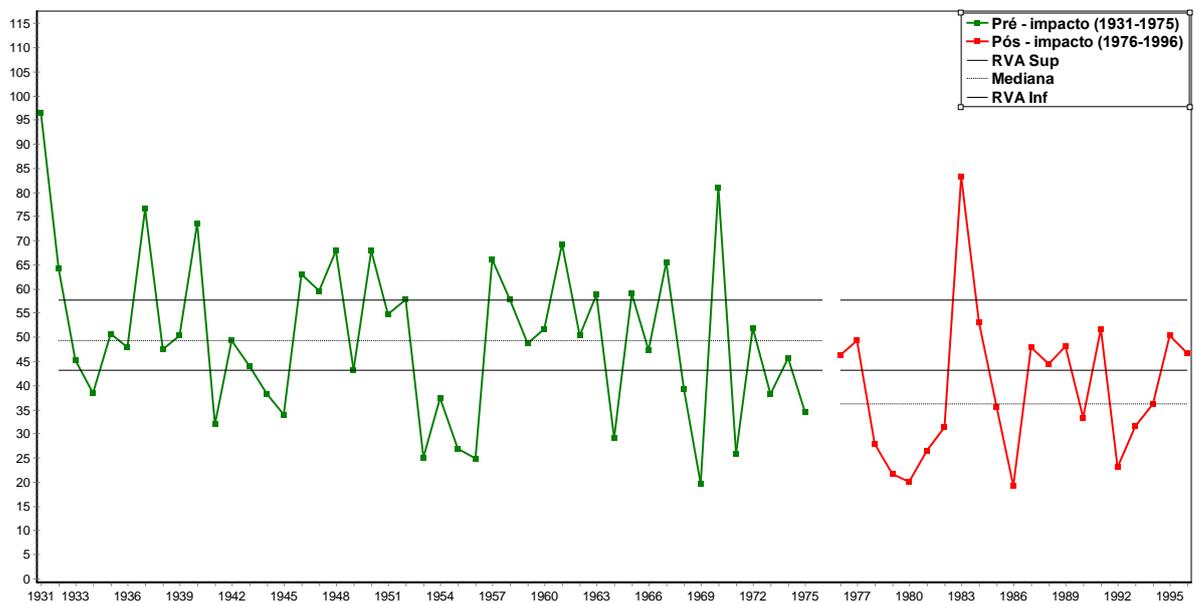


Figura 28. Série temporal da vazão máxima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 3

Na Tabela 3, observa-se que a mediana das datas do calendário Juliano das vazões mínimas anuais se encontra no dia 274, início de outubro, no período pré-impacto e no dia 30, final de outubro, 1 no período pós-impacto. Já para vazões máximas, estas medianas se encontram no dia 33 no período pré-impacto e no dia 28 no período pós-impacto. As possíveis influências no ecossistema seriam sobre as condições da água, podendo determinar o ciclo de vida das espécies ou influenciar o grau de estresse ou mortalidade associada a condições extremas de água, tais como inundações ou secas [4,6].

Grupo 4

As medianas dos números de baixo pulso e de alto pulso no período pós-impacto são maiores do que no período pré-impacto, enquanto que os coeficientes de variação são menores. Já as medianas das durações de baixo pulso e de alto pulso no período pós-impacto são menores do que no período pré-impacto, causando uma possível influencia na reprodução ou eventos de mortalidade para várias espécies e na população dinâmica no reservatório da bacia hidrográfica do rio Atibaia [4,6], Figuras 30-33. Destacam-se com valores elevados os anos 1990 e 1993 para o número de baixo pulso, o ano de 1946 para a duração de baixo pulso, o ano de 1976 para o número de alto pulso e os anos de 1957 e 1966 para a duração de alto pulso, em razão da presença do El Niño de moderado a forte [44,45].

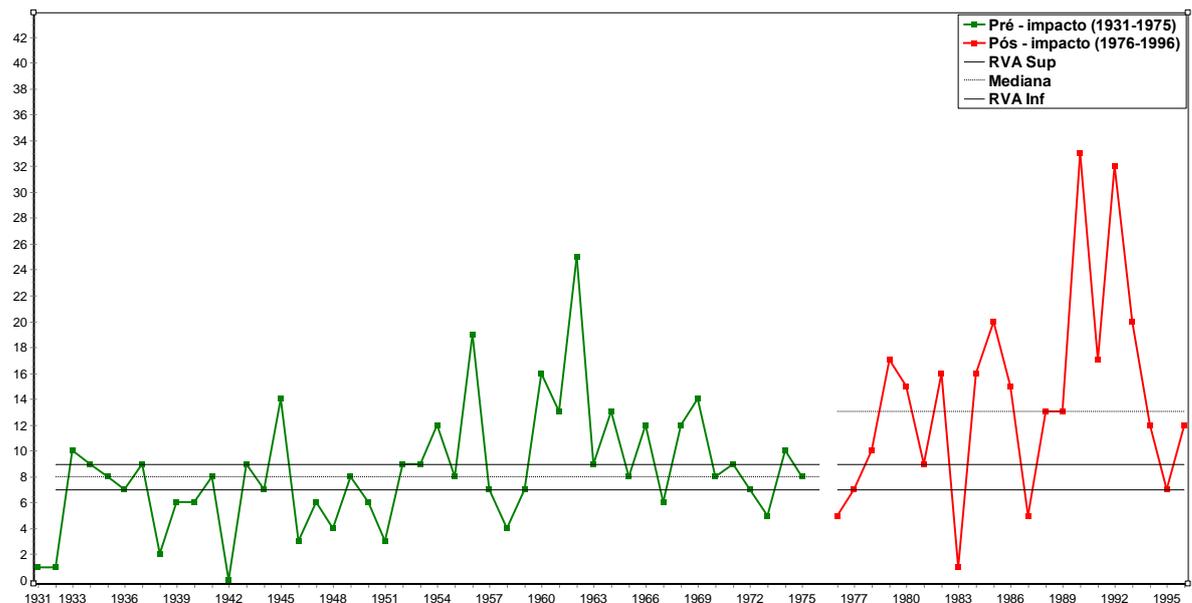


Figura 29. Série temporal do número de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

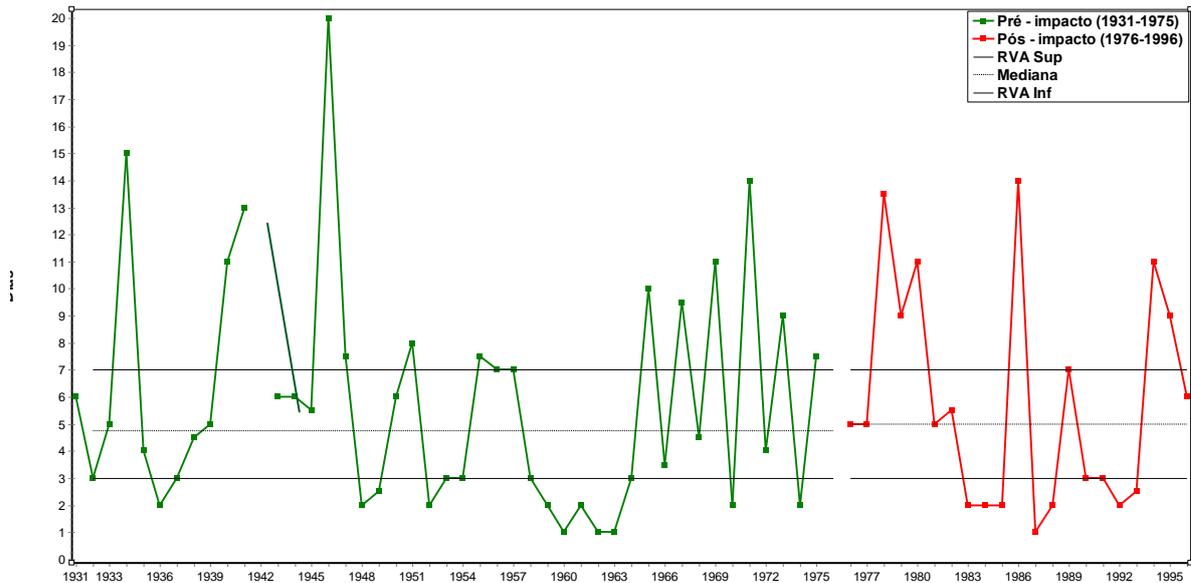


Figura 30. Série temporal da duração de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

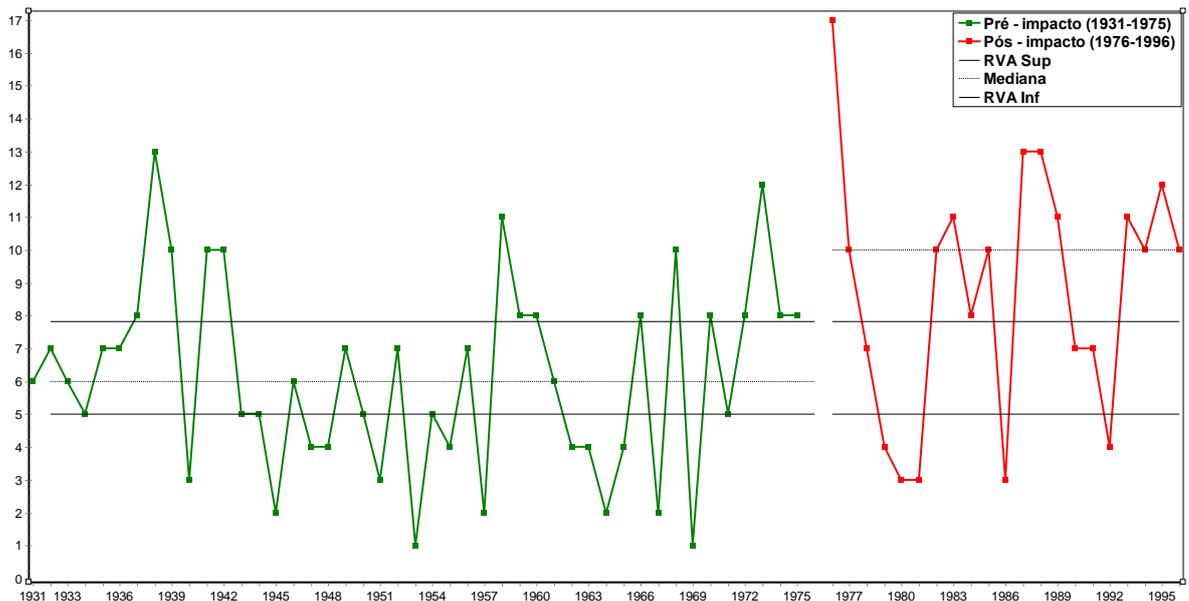


Figura 31. Série temporal do número de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

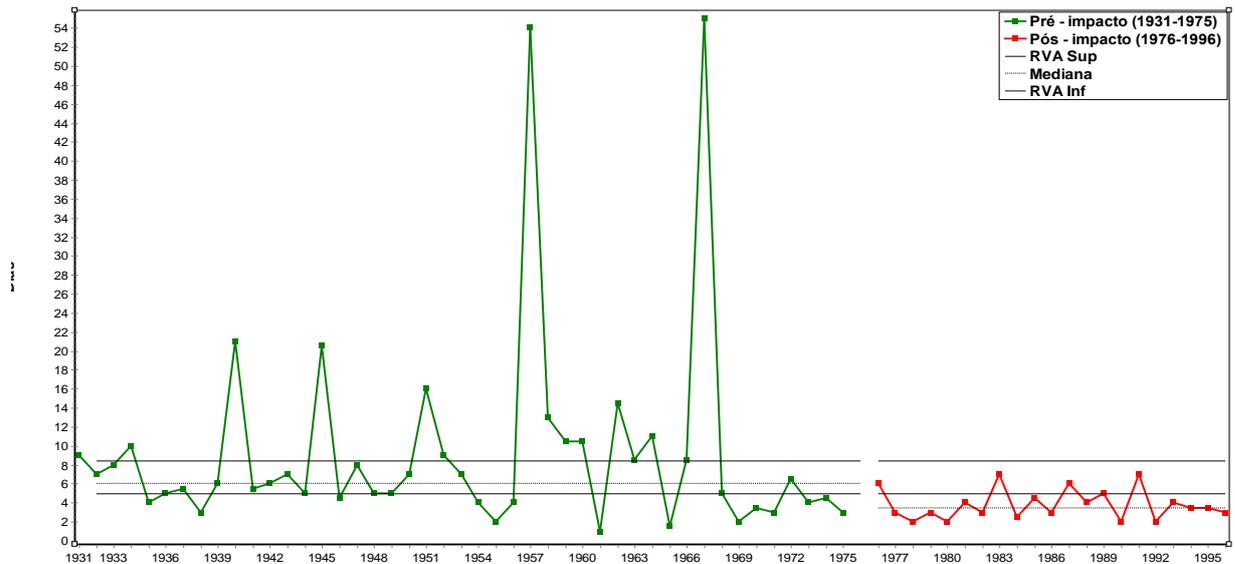


Figura 32. Série temporal da duração de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 5

As medianas da taxa de crescimento, taxa de queda e número de reversões aumentaram e os coeficientes de variação permaneceram estáveis para todo o período no reservatório da bacia hidrográfica do rio Atibaia, Figuras 34-36. Nota-se na taxa de crescimento e queda que o ano de 1983 assume valores discrepantes que podem ser justificado pela forte ocorrência de El Niño neste ano [44,45].

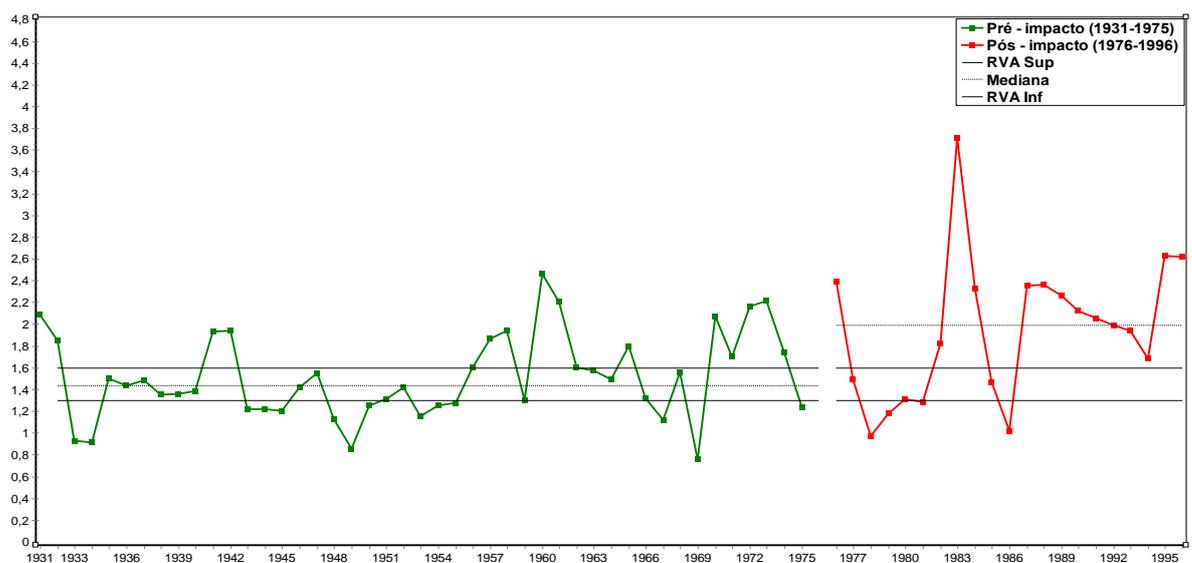


Figura 33. Série temporal da taxa de crescimento da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

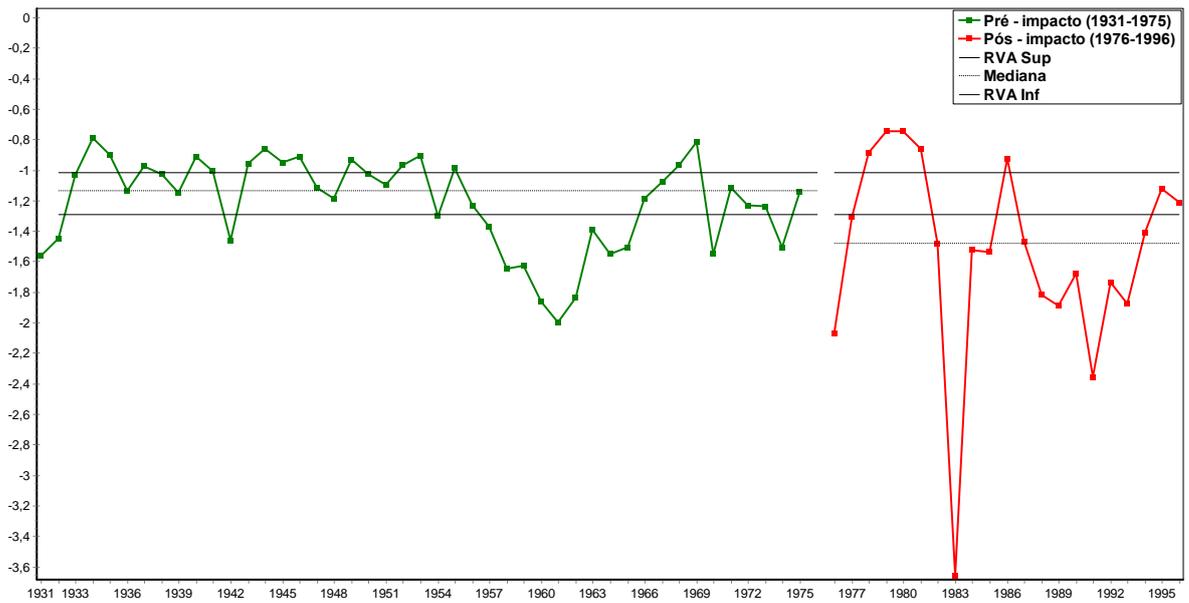


Figura 34. Série temporal da taxa de queda da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

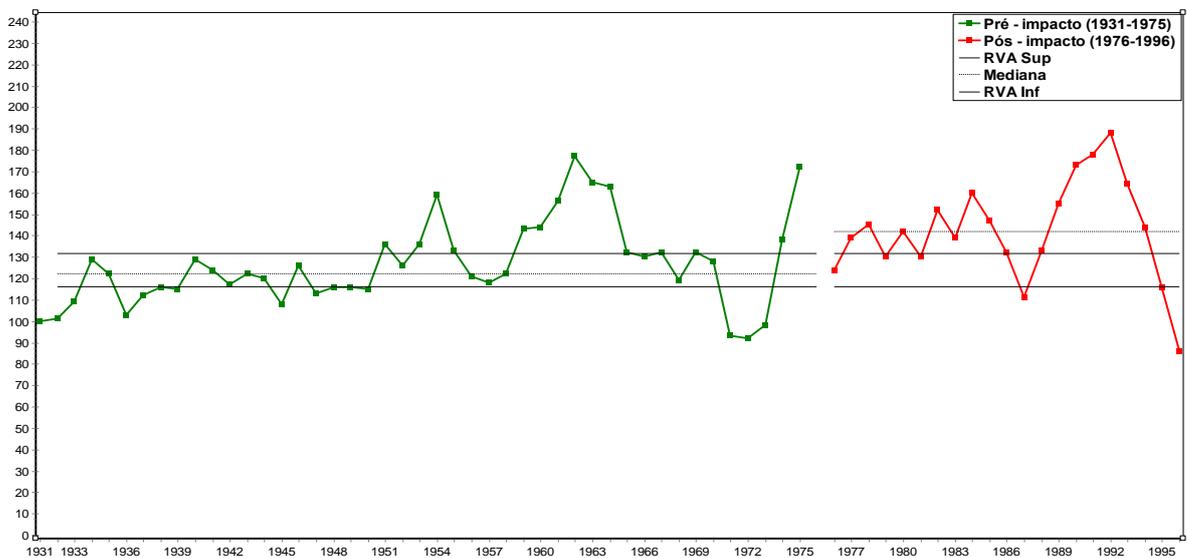


Figura 35. Série temporal dos números de reversões da bacia hidrográfica do rio Atibaia antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Alterações hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Jaguari

A Figura 36 representa o gráfico do comportamento da vazão diária da bacia hidrográfica do rio Jaguari dividida em dois períodos de 01/10/1930 a 30/09/1980 e 01/10/1984 a 30/09/1998. Na Tabela 6 mostra as estatísticas descritivas: mediana, coeficiente de variação (CV), mínimo e máximo dos parâmetros do IHA para os períodos antes e depois da construção do reservatório. Os fatores de maior alteração hidrológica da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira são os indicadores dos grupos 1 e 2 quando se consideram todos os 33 parâmetros para os limites do RVA ± 17 percentis da mediana e ± 25 percentis da mediana mostrados nas Tabelas 7 e 8. Destacando que não existe uma diferença significativa nos fatores de alteração hidrológica para os diferentes limites do RVA como é visto na Figura 37.

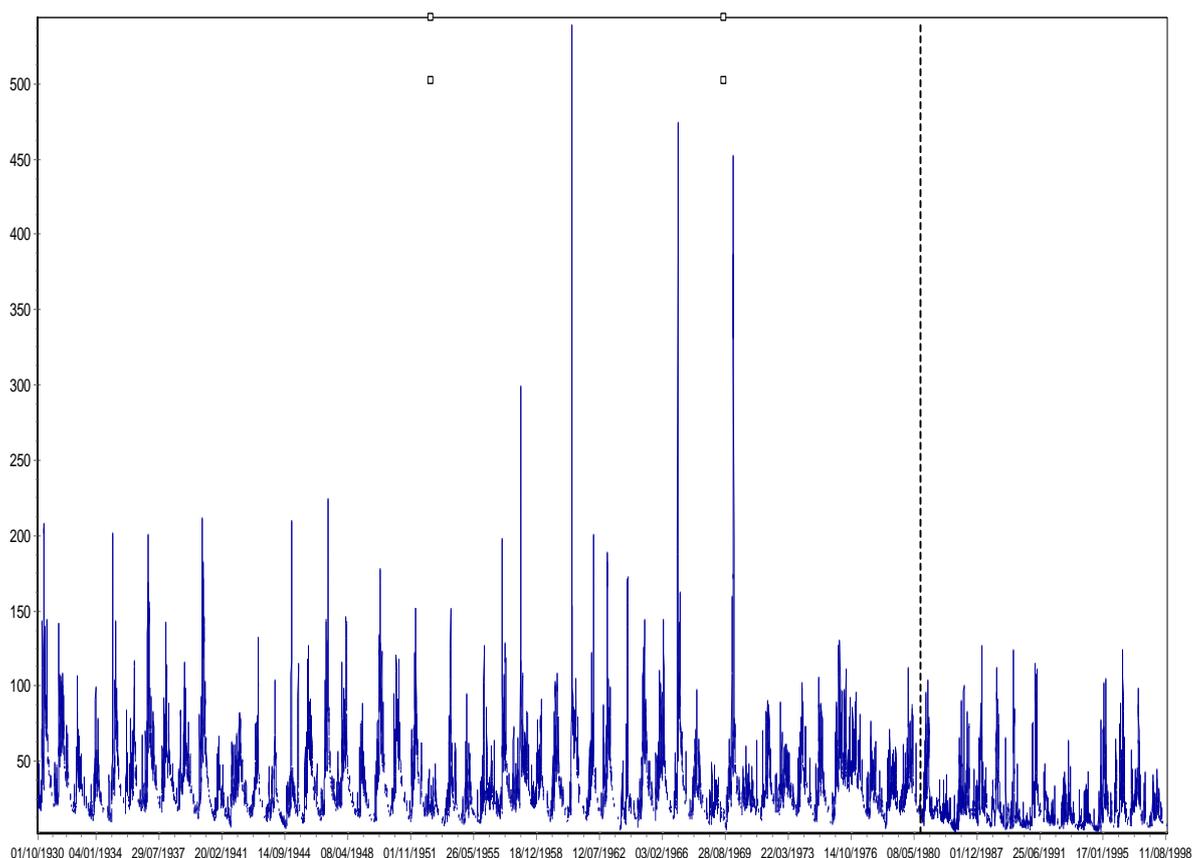


Figura 36. Série temporal da vazão diária do da bacia rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Tabela 6. Estatística descritiva dos 33 parâmetros do IHA da bacia hidrográfica do rio Jaguari.

Grupos IHA	Período Pré – impacto: 1931 – 1980 (49 anos)				Período Pós – impacto: 1985 – 1998 (13 anos)			
	Mediana	Mínimo	Máximo	CV	Mediana	Mínimo	Máximo	CV
<u>Grupo 1</u>								
Janeiro	45,28	13,86	98,34	0,70	18,90	10,25	66,62	1,47
Fevereiro	51,98	17,94	129,8	0,53	25,64	8,98	73,90	1,20
Março	50,81	19,27	84,14	0,65	21,33	12,81	75,77	0,77
Abril	35,25	17,70	59,50	0,55	12,29	9,02	92,12	0,78
Maiο	28,61	13,90	46,82	0,41	12,52	8,26	36,03	0,62
Junho	23,31	13,86	47,23	0,37	10,05	7,13	34,02	0,60
Julho	20,25	11,57	43,18	0,31	9,00	6,98	17,26	0,56
Agosto	16,58	10,59	37,41	0,37	7,99	5,33	20,40	0,52
Setembro	14,27	8,20	50,88	0,45	8,74	5,66	24,75	1,16
Outubro	16,91	8,42	45,74	0,52	13,41	4,94	40,74	0,98
Novembro	22,88	8,90	45,69	0,52	13,77	7,12	23,29	0,75
Dezembro	30,98	13,57	72,58	0,65	13,13	7,57	35,11	0,78
<u>Grupo 2</u>								
Mínimo 1-dia	10,42	4,96	16,93	0,43	4,83	1,98	7,69	0,34
Mínimo 3-dia	11,10	5,44	17,74	0,38	5,84	3,99	10,35	0,23
Mínimo 7-dia	11,64	6,05	18,23	0,35	6,06	4,31	11,46	0,25
Mínimo 30-dia	13,37	7,88	22,66	0,37	7,24	5,42	13,05	0,23
Mínimo 90-dia	17,39	10,46	30,60	0,32	9,07	6,37	16,84	0,35
Máximo 1-dia	126,70	48,31	538,90	0,75	102,20	41,22	127,4	0,68
Máximo 3-dia	116,20	44,96	461,40	0,70	87,51	36,14	118,50	0,76
Máximo 7-dia	103,40	37,57	317,10	0,67	71,25	29,29	104,70	0,89
Máximo 30-dia	73,01	29,48	144,00	0,48	52,47	18,94	77,18	0,82
Máximo 90-dia	58,80	23,51	98,75	0,53	33,84	17,10	55,66	0,87
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0
Escoamento de base	0,35	0,20	0,53	0,30	0,35	0,24	0,48	0,52
<u>Grupo 3</u>								
Dia Juliano mínimo	273	217	339	0,05	262	206	334	0,21
Dia Juliano máximo	30	3	365	0,15	64	3	282	0,15
<u>Grupo 4</u>								
Número de baixo pulso	6	1	16	0,83	12	10	19	0,60
Duração de baixo pulso	7,50	1	138	1,00	6,25	3	15	0,78
Número de alto pulso	6,5	2	15	0,69	4,5	0	10	1,28
Duração de alto pulso	5	2	71	0,62	2	1	13,5	1,25
<u>Grupo 5</u>								
Taxa de crescimento	2,04	0,96	4,60	0,38	1,54	0,98	2,76	0,55
Taxa de queda	-1,24	-2,31	-0,70	-0,24	-1,14	-1,92	-0,72	-0,42
Número de reversão	103	76	140	0,23	138	99	184	0,31

Tabela 7. Limites RVA \pm 17 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológico (HA) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológico (HA)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	37,99	56,99	1,46	-0,80	-0,55
Fevereiro	43,76	64,25	1,46	-0,60	-0,78
Março	38,34	62,41	1,46	-0,80	-0,55
Abril	27,33	41,00	1,90	-1,00	-0,78
Maio	23,58	30,79	1,68	-0,80	-0,78
Junho	20,28	26,14	1,68	-1,00	-0,55
Julho	17,93	21,89	2,12	-1,00	-1,00
Agosto	15,33	18,36	1,68	-0,80	-0,78
Setembro	13,10	16,66	1,23	-0,80	-0,33
Outubro	14,74	20,59	0,79	-0,60	-0,11
Novembro	19,41	27,00	1,46	-0,40	-1,00
Dezembro	28,11	39,05	1,68	-0,60	-1,00
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	9,50	11,69	2,12	-1,00	-1,00
Mínimo 3-dia	9,80	12,25	1,90	-0,80	-1,00
Mínimo 7-dia	10,15	12,93	1,90	-0,80	-1,00
Mínimo 30-dia	11,79	14,75	1,90	-0,80	-1,00
Mínimo 90-dia	15,74	19,44	1,90	-0,80	-1,00
Máximo 1-dia	103,7	152,00	0,56	0,39	-1,00
Máximo 3-dia	96,14	144,50	1,00	-0,01	-1,00
Máximo 7-dia	84,71	130,30	1,00	-0,01	-1,00
Máximo 30-dia	63,59	85,47	1,00	-0,01	-1,00
Máximo 90-dia	49,53	70,74	1,46	-0,40	-1,00
Número de vazão nula	0	0	0	0	0
Escoamento de base	0,31	0,38	0,34	-0,80	-1,00
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	267,80	280,3	0,79	-1,00	0,34
Dia Juliano máximo	32,83	76,17	-0,33	0,19	0,12
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	4	8	-1,00	-1,00	3,54
Duração de baixo pulso	5	10	-0,24	0,53	-0,52
Número de alto pulso	5,83	8	0,79	-0,51	-0,11
Duração de alto pulso	4	6	1,38	-0,38	-0,76
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,76	2,26	1,00	-0,40	-0,55
Taxa de queda	-1,32	-1,13	-0,33	-0,21	0,56
Número de reversão	96,49	109,20	-1,00	-0,40	1,46

Tabela 8. Limites RVA \pm 25 percentis da mediana e Fator de Alteração Hidrológico (HA) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológico (HA)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	35,17	66,87	1,86	-0,43	-1,00
Fevereiro	38,99	66,46	1,29	-0,29	-0,71
Março	34,68	67,93	2,14	-1,00	-0,14
Abril	24,67	44,13	2,43	-0,86	-0,71
Mai	21,74	33,55	2,43	-0,86	-0,71
Junho	18,50	27,21	2,43	-1,00	-0,43
Julho	16,03	22,37	2,71	-0,86	-1,00
Agosto	13,18	19,33	2,43	-0,86	-0,71
Setembro	12,18	18,58	1,86	-0,86	-0,14
Outubro	13,81	22,59	1,29	-0,57	-0,14
Novembro	17,48	29,39	1,86	-0,43	-1,00
Dezembro	26,96	46,97	2,43	-0,71	-1,00
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	8,47	12,96	3,00	-1,00	-1,00
Mínimo 3-dia	8,82	13,09	2,71	-0,86	-1,00
Mínimo 7-dia	9,40	13,44	2,71	-0,86	-1,00
Mínimo 30-dia	11,06	16,02	2,71	-0,86	-1,00
Mínimo 90-dia	14,36	20,00	2,43	-0,71	-1,00
Máximo 1-dia	96,01	190,80	0,43	0,00	-1,00
Máximo 3-dia	92,18	173,90	1,29	-0,14	-1,00
Máximo 7-dia	81,64	150,50	1,29	-0,14	-1,00
Máximo 30-dia	57,42	92,76	1,00	0,00	-1,00
Máximo 90-dia	43,32	74,41	1,57	-0,29	-1,00
Número de vazão nula	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Escoamento de base	0,29	0,40	0,43	-0,57	0,71
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	265,00	283,30	1,29	-1,00	0,71
Dia Juliano máximo	2,00	56,25	0,00	-0,29	1,57
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	3,00	8,00	-1,00	-1,00	3,00
Duração de baixo pulso	4,50	12,00	-0,14	0,29	-0,43
Número de alto pulso	4,00	8,50	1,00	-0,43	-0,14
Duração de alto pulso	3,88	7,00	1,57	-0,43	-0,71
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,62	2,39	1,29	-0,29	-0,71
Taxa de queda	-1,39	-1,09	-0,14	-0,29	0,71
Número de reversão	89,00	112,50	-1,00	-0,57	2,14

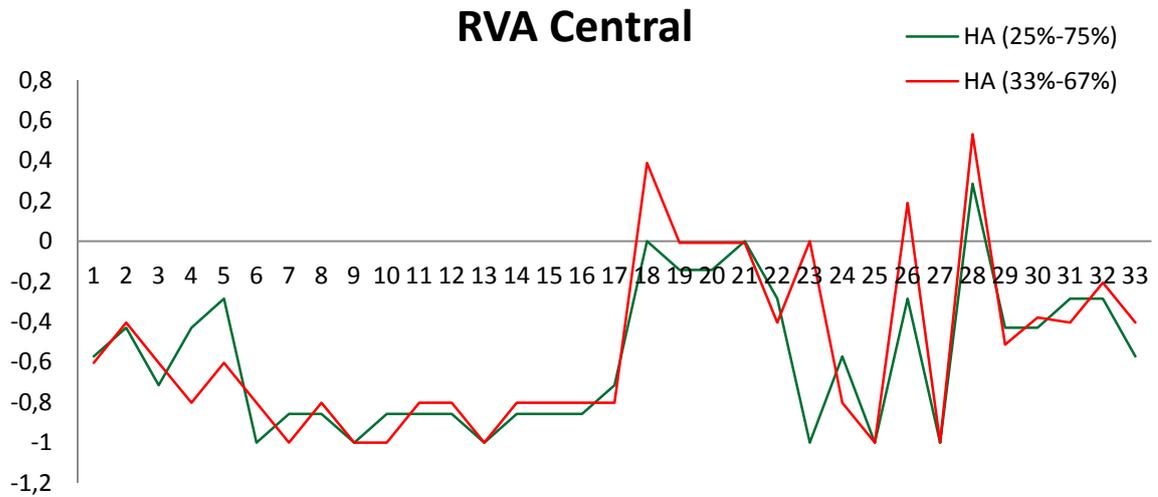


Figura 37. Fatores de alteração hidrológica HA (25% - 75%) x HA (33% - 67%) da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA central.

Grupo 1

As medianas das vazões mensais pós-impacto indicam uma tendência decrescente significativa em comparação com os do período pré-impacto, como ilustra a Figura 38. Os coeficientes de variação para o período pós-impacto são maiores do que o período pré-impactos, indicando maiores variações mensais relativas das vazões no período pós-impacto devido à construção do reservatório.

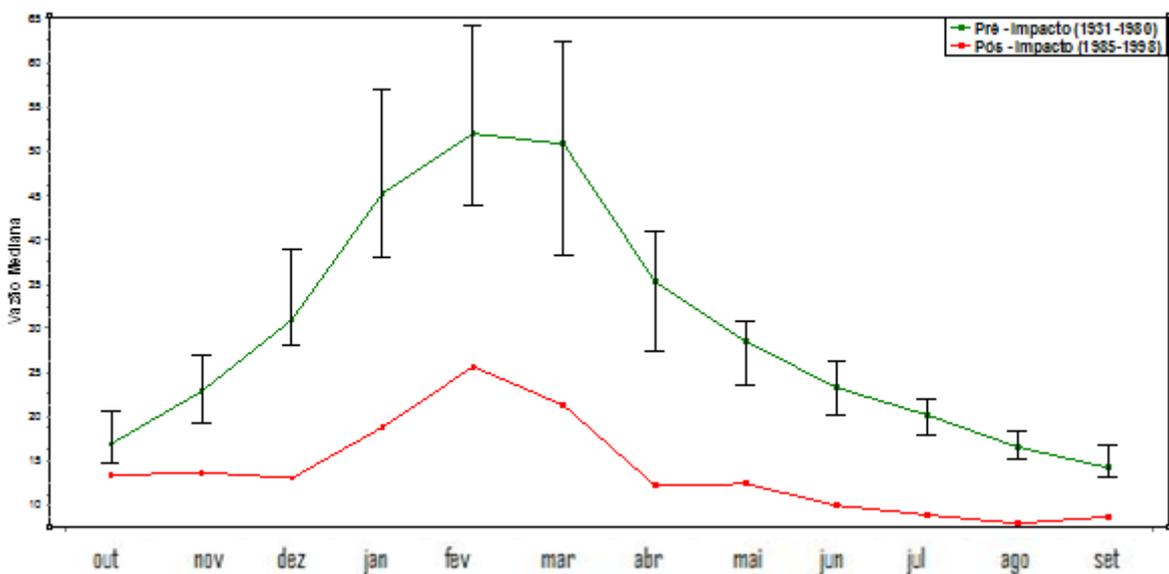


Figura 38. Alteração da distribuição sazonal das vazões mensais da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

As Figuras 39-50 mostram os gráficos dos 12 parâmetros do grupo 1 e representam as distribuições das medianas vazões mensais para todos os anos. Nota-se que alguns anos destacam-se com as medianas das vazões mensais elevadas e pode-se justificar pela ocorrência do fenômeno El Niño, como, por exemplo, os anos de 1939, 1946, 1967, 1976, 1991 houve uma forte ou moderada intensidade do El Niño [44,45] e destaca-se o ano de 1991 com a mediana da vazão do mês de abril atingiu o maior valor depois da construção do reservatório. As influências no ecossistema são na disponibilidade de habitat para os organismos aquáticos, umidade do solo para as planta, água e alimentos para os animais terrestres, confiabilidade de abastecimento de água para população e influência na temperatura da água e no nível de oxigênio [4,6].

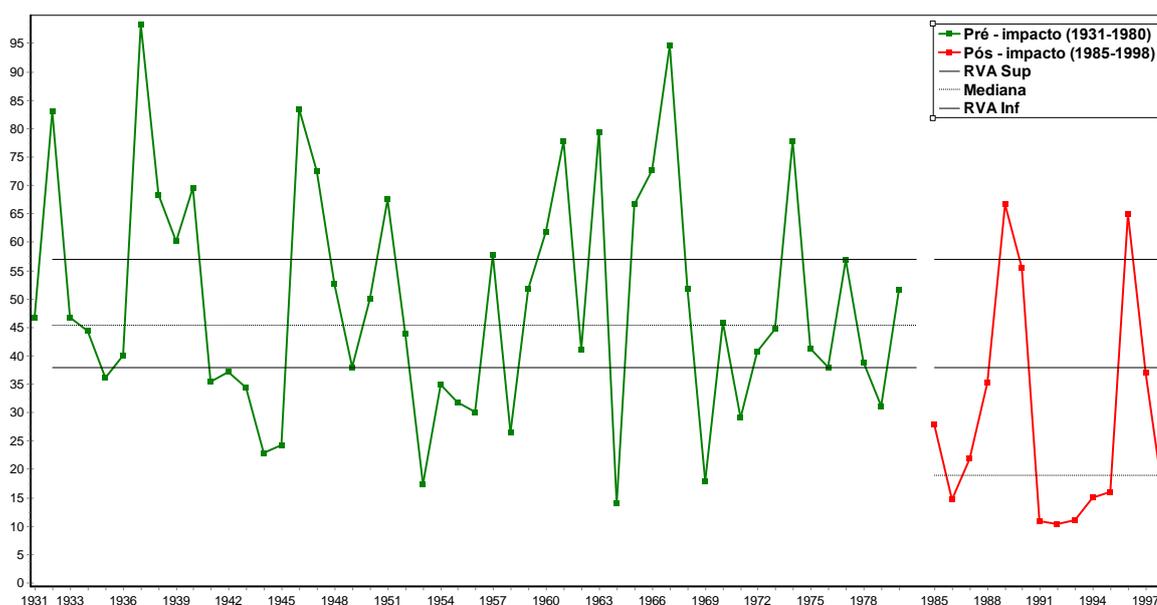


Figura 39. Série temporal da vazão mensal de janeiro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

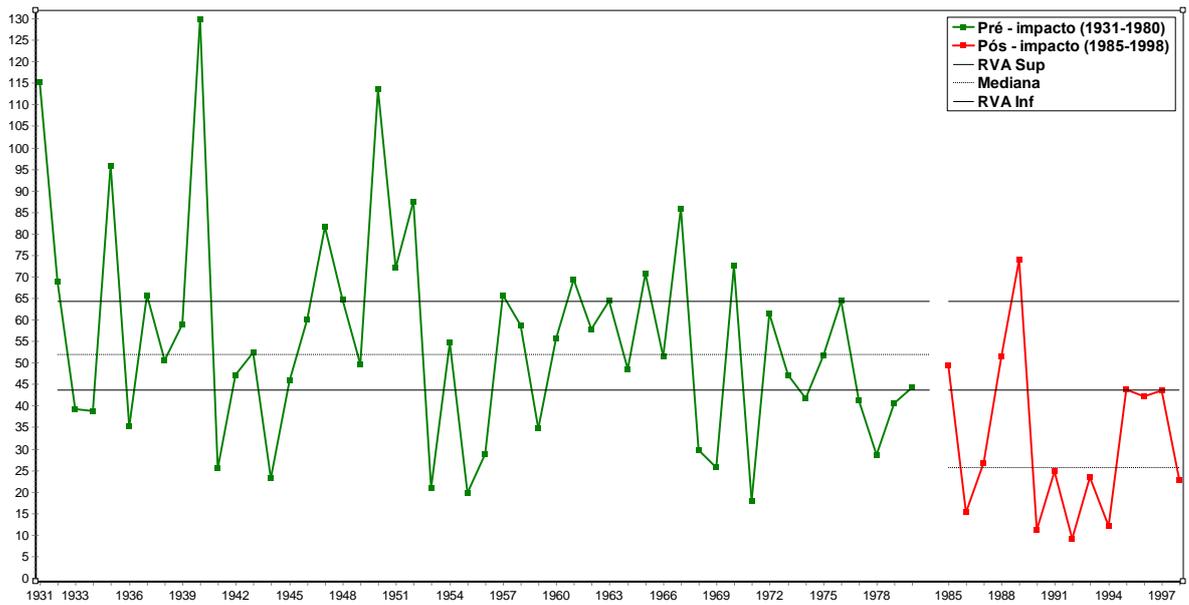


Figura 40. Série temporal da vazão mensal de fevereiro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

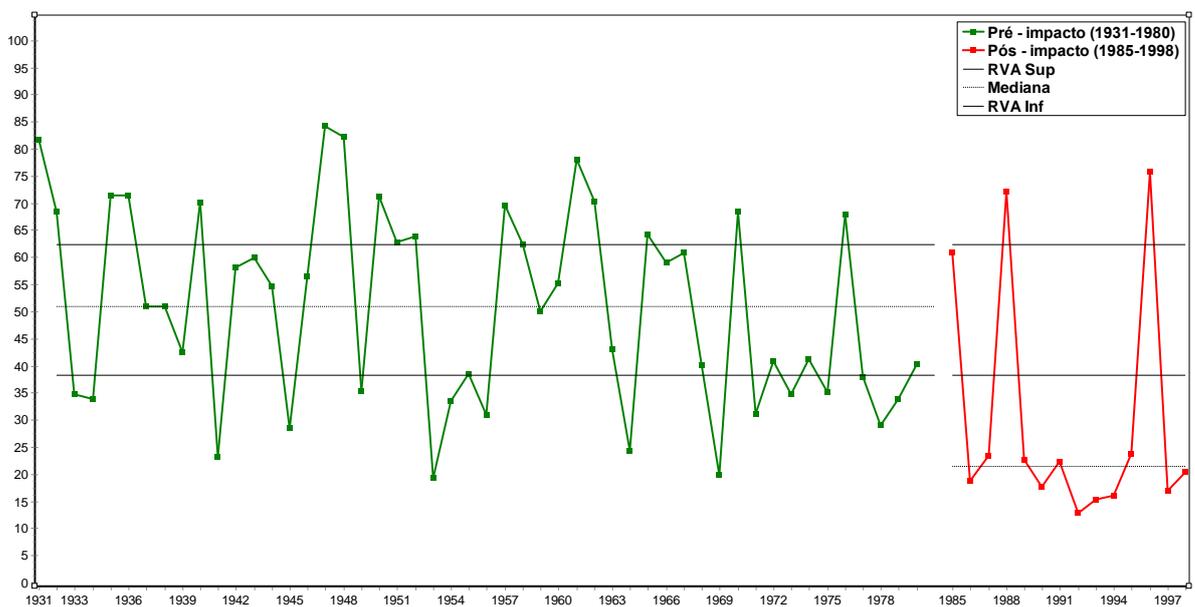


Figura 41. Série temporal da vazão mensal de março da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

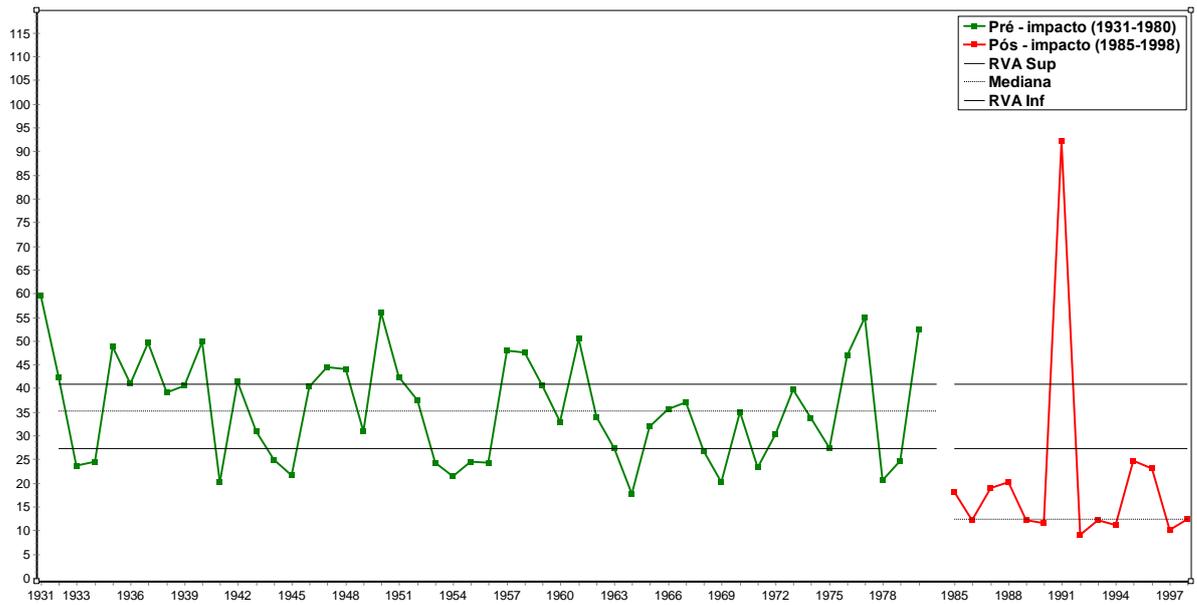


Figura 42. Série temporal da vazão mensal de abril da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

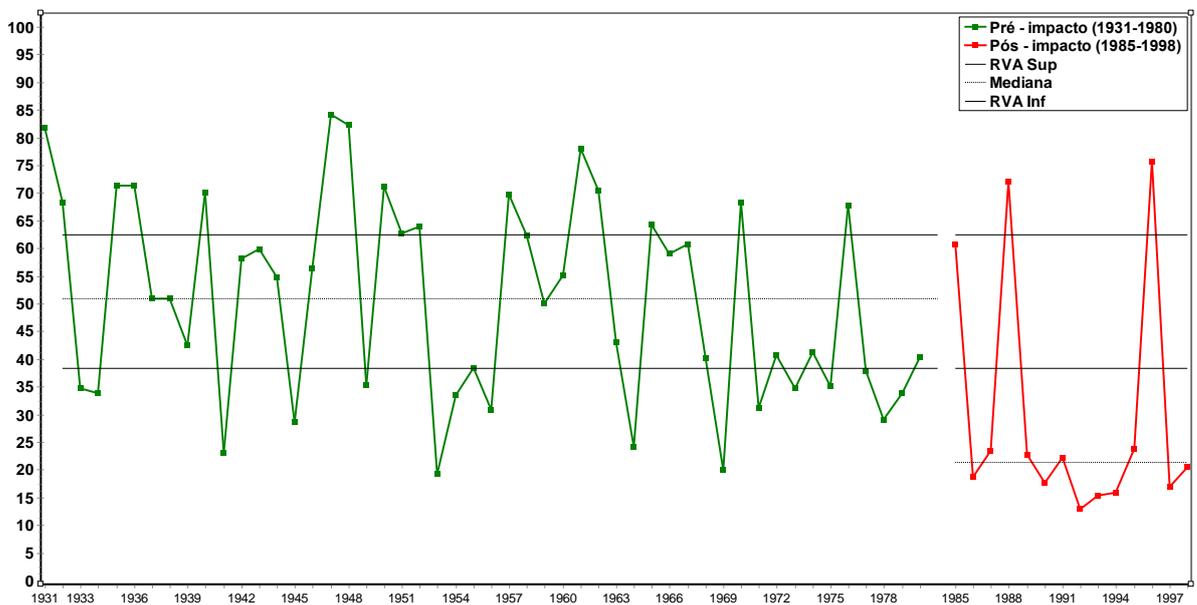


Figura 43. Série temporal da vazão mensal de maio da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

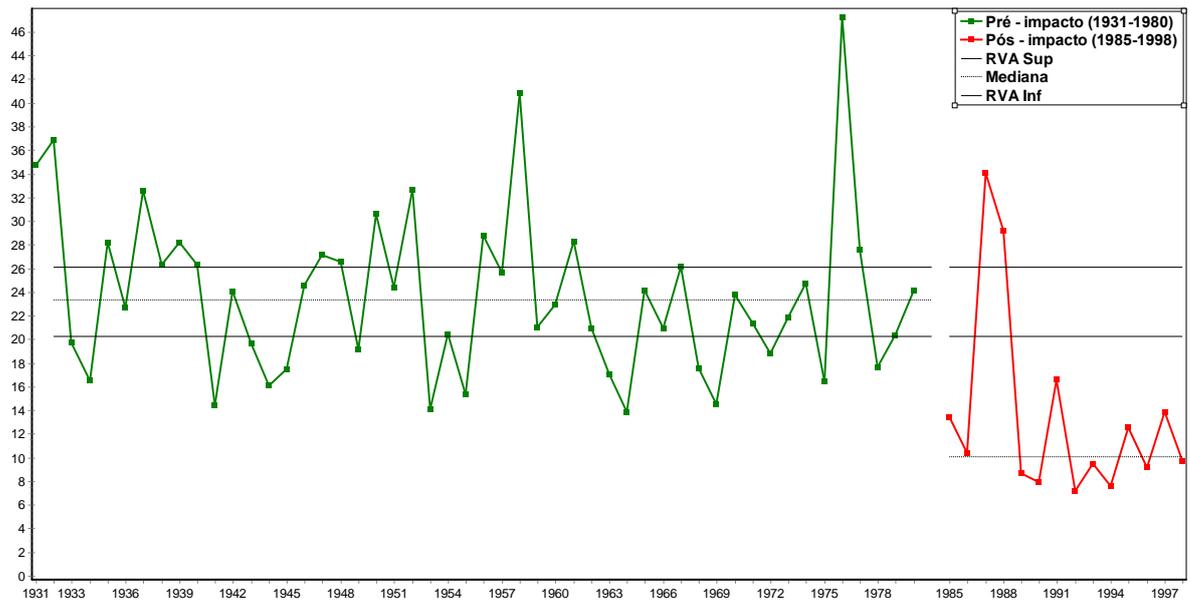


Figura 44. Série temporal da vazão mensal de junho da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

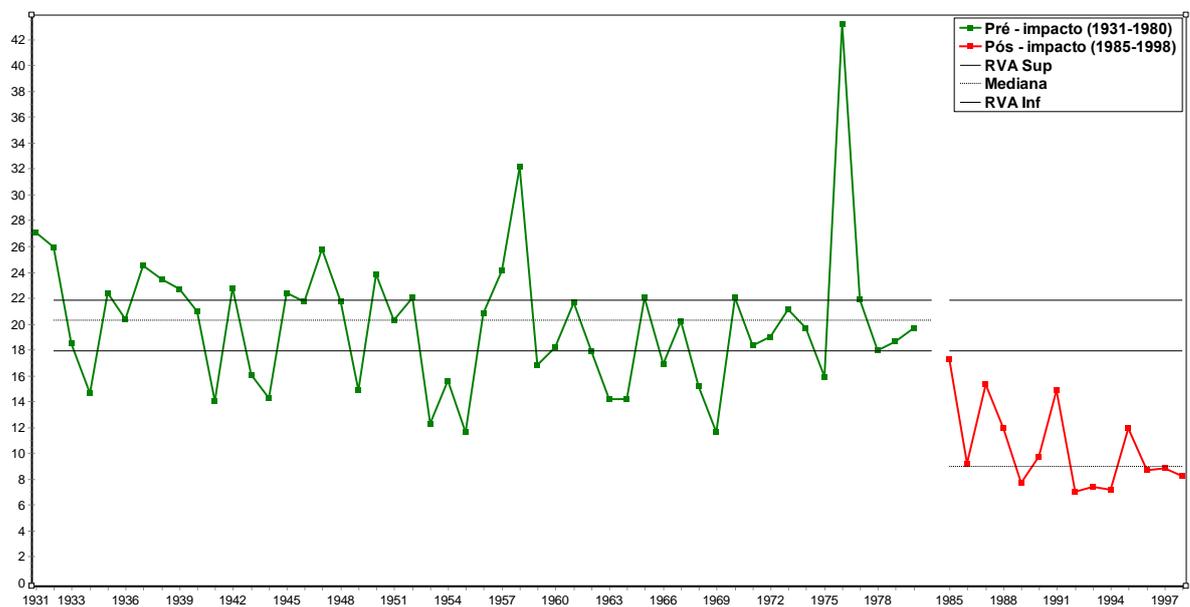


Figura 45. Série temporal da vazão mensal de julho da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

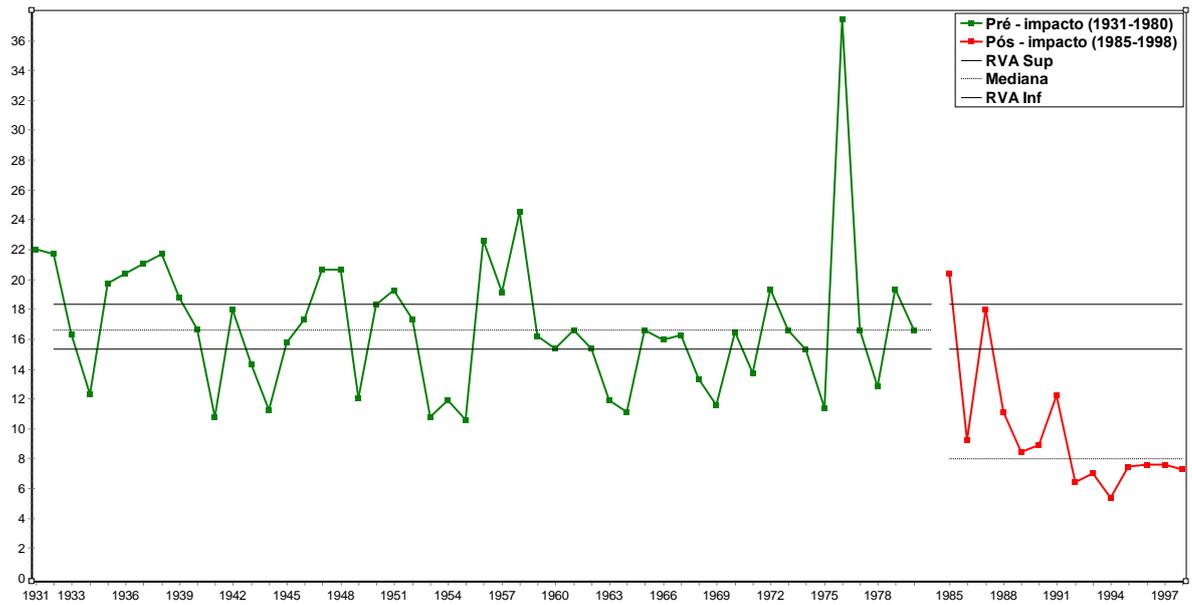


Figura 46. Série temporal da vazão mensal de agosto da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

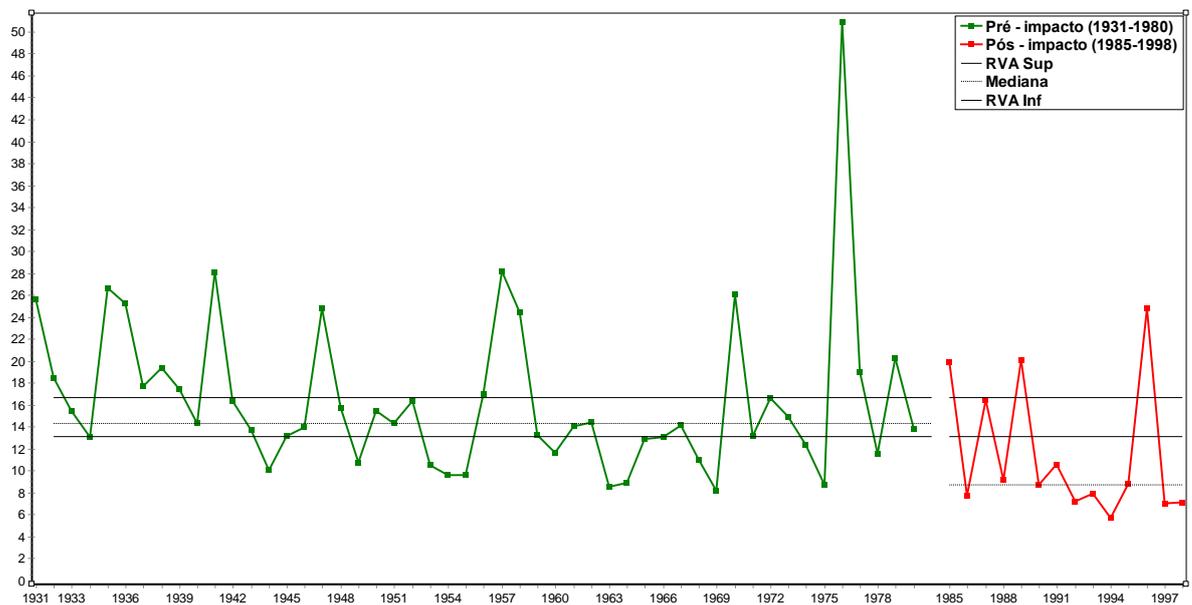


Figura 47. Série temporal da vazão mensal de setembro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

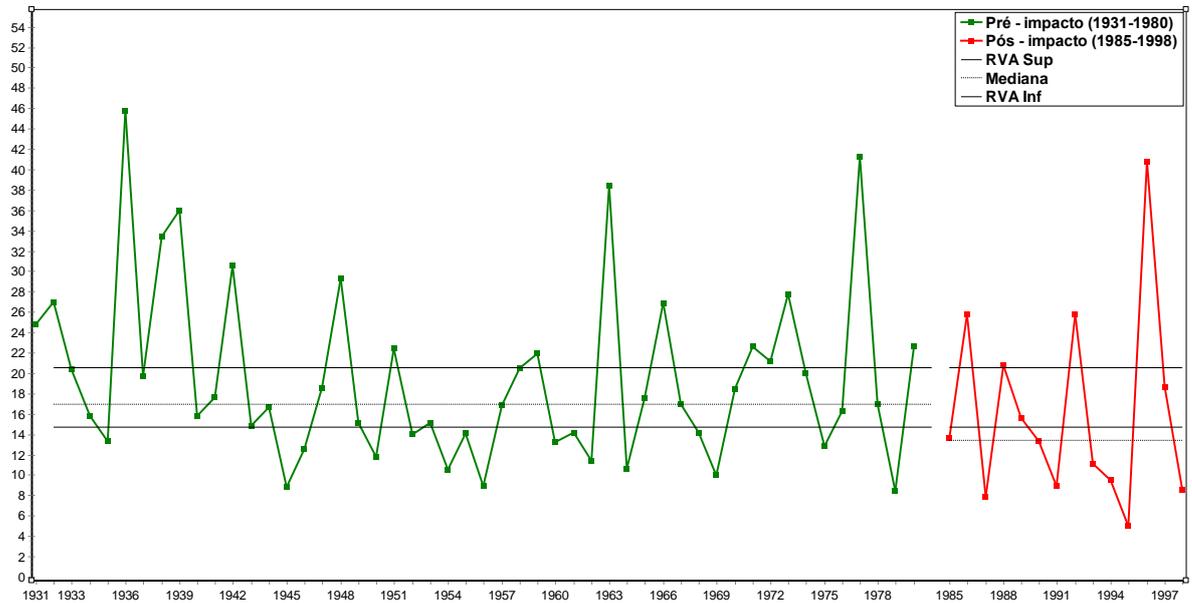


Figura 48. Série temporal da vazão mensal de outubro da bacia hidrográfica do rio Jaguarí antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

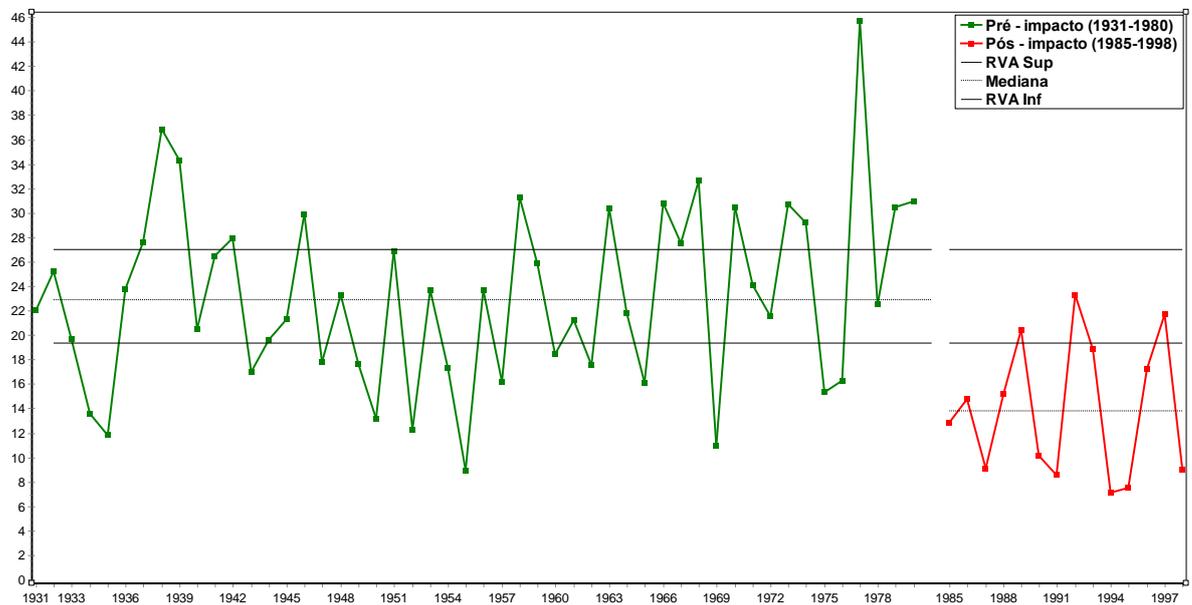


Figura 49. Série temporal da vazão mensal de novembro da bacia hidrográfica do rio Jaguarí antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

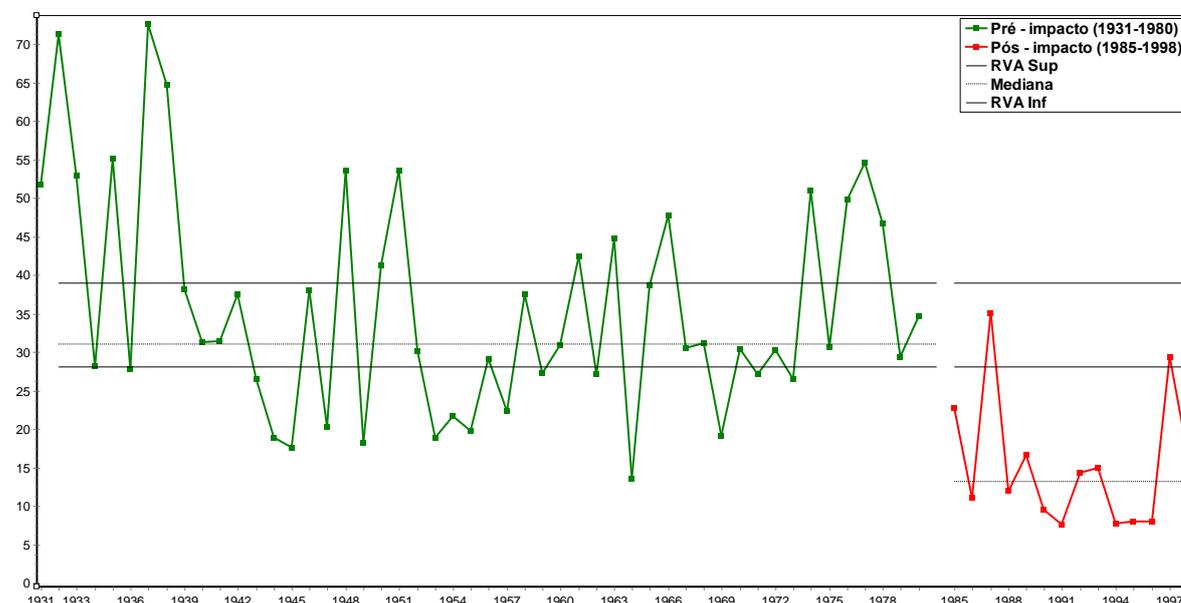


Figura 50. Série temporal da vazão mensal de dezembro da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 2

Os resultados dos parâmetros do grupo 2 indicam que os ciclos vazão mínima e máxima, diária, semanal, Mensal e trimestral são influenciadas negativamente pela construção do reservatório como mostra as Figuras 51-60. Os coeficientes de variação e as medianas anuais das vazões mínimas e máximas no período pós-impacto diminuem significativamente, indicando uma alteração hidrológica como pode ser visto nos fatores de hidrológicos ilustrados na Tabela 6. Destacam-se com valores mais elevados as vazões máximas diárias e semanais ocorreram nos anos 1967 e 1970 justificada pela presença moderada do El Niño [44,45]. As principais influenciam no ecossistema é a criação de locais para a colonização de plantas ou redução da umidade do solo para as plantas, desidratação nos animais ou influência para a reprodução de certas espécies, distribuição de comunidades de plantas em lagos, várzeas, duração dos fluxos elevados para a eliminação de resíduos, duração do nível de oxigênio inadequado [4,6].

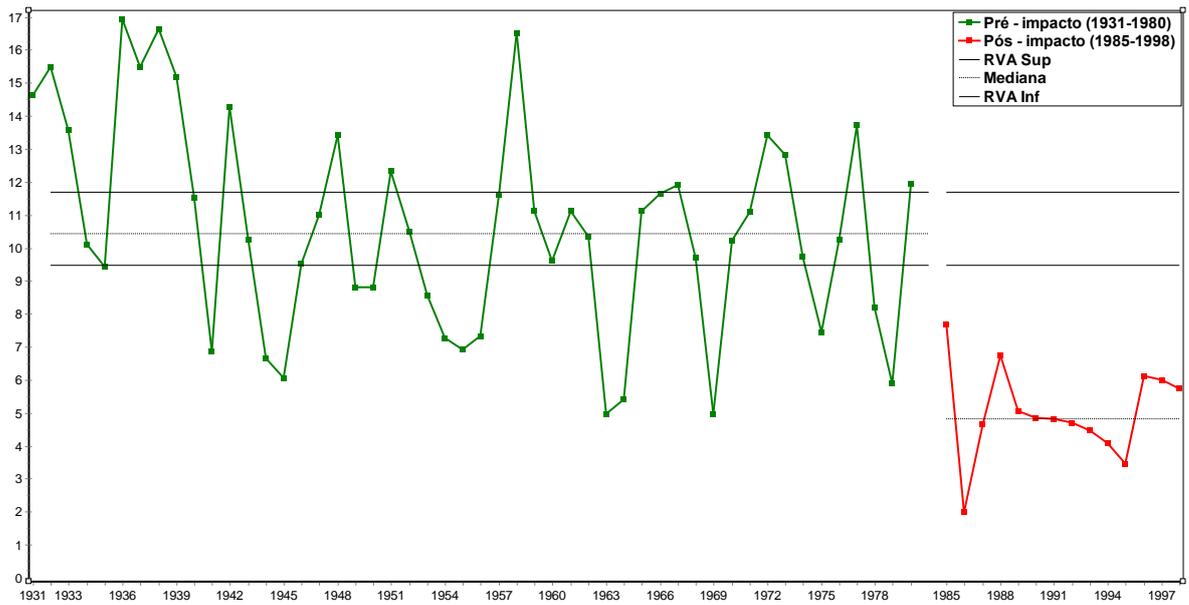


Figura 51. Série temporal da vazão mínima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

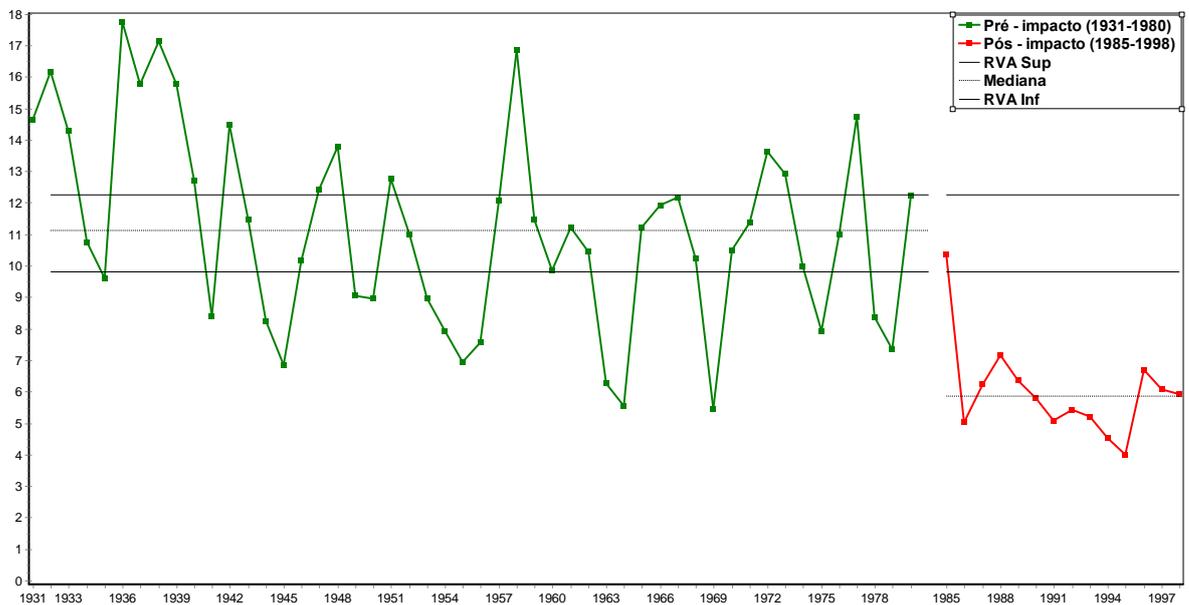


Figura 52. Série temporal da vazão mínima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

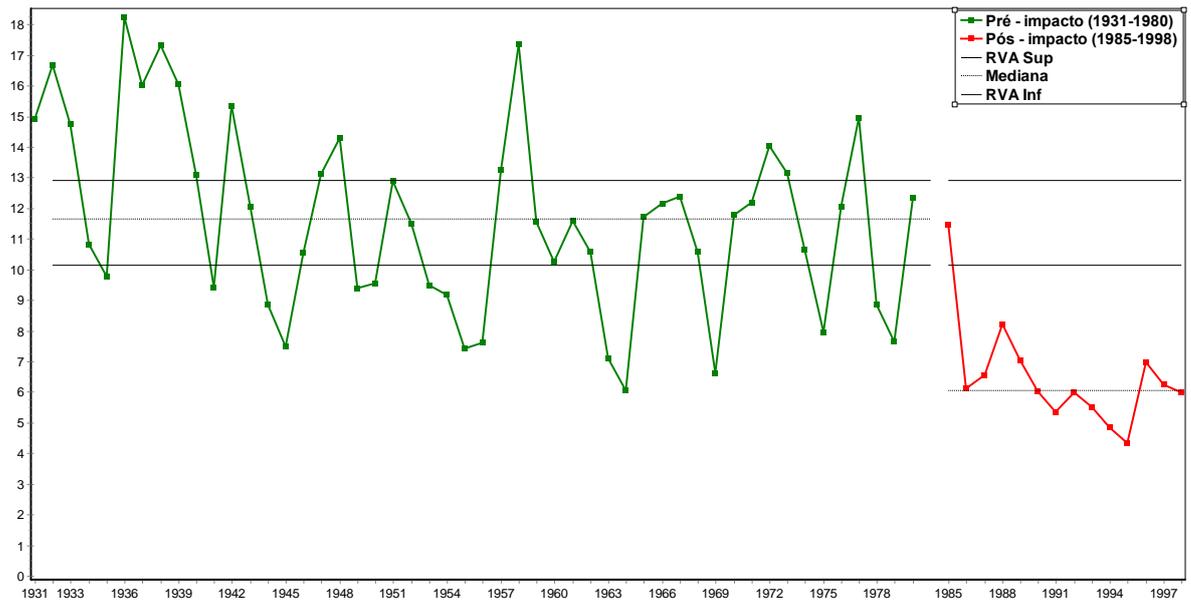


Figura 53. Série temporal da vazão mínima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

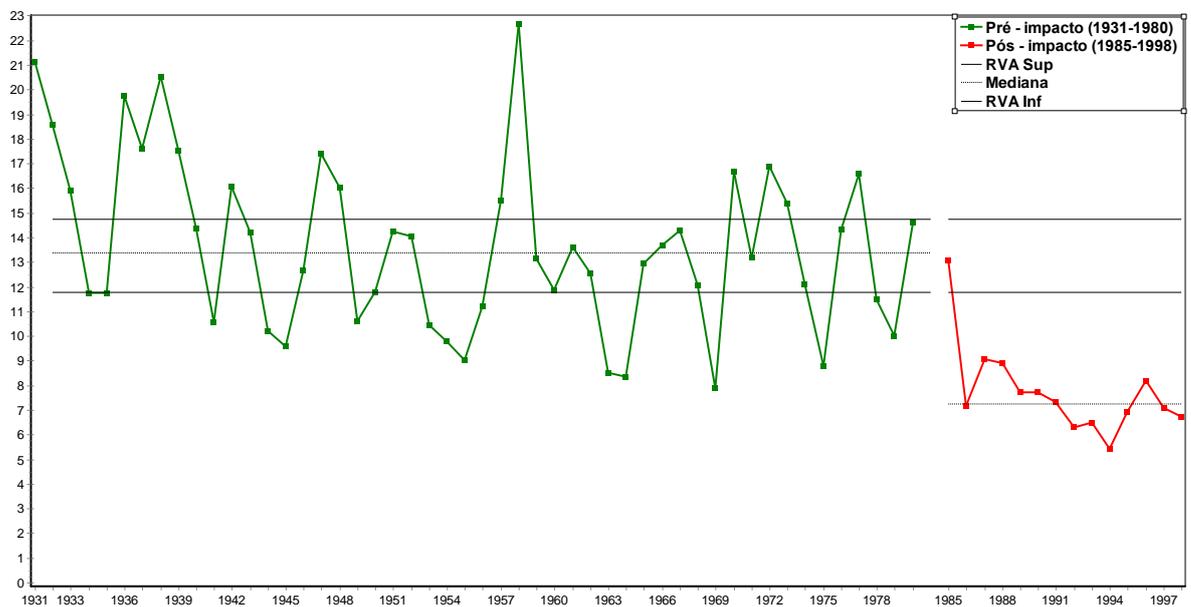


Figura 54. Série temporal da vazão mínima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

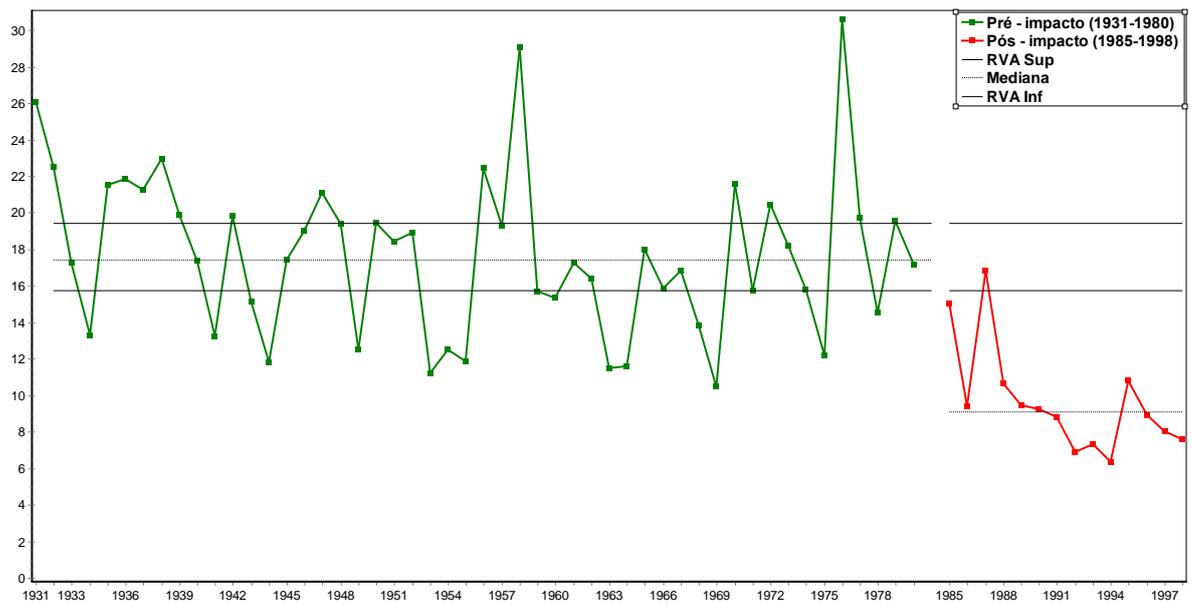


Figura 55. Série temporal da vazão mínima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

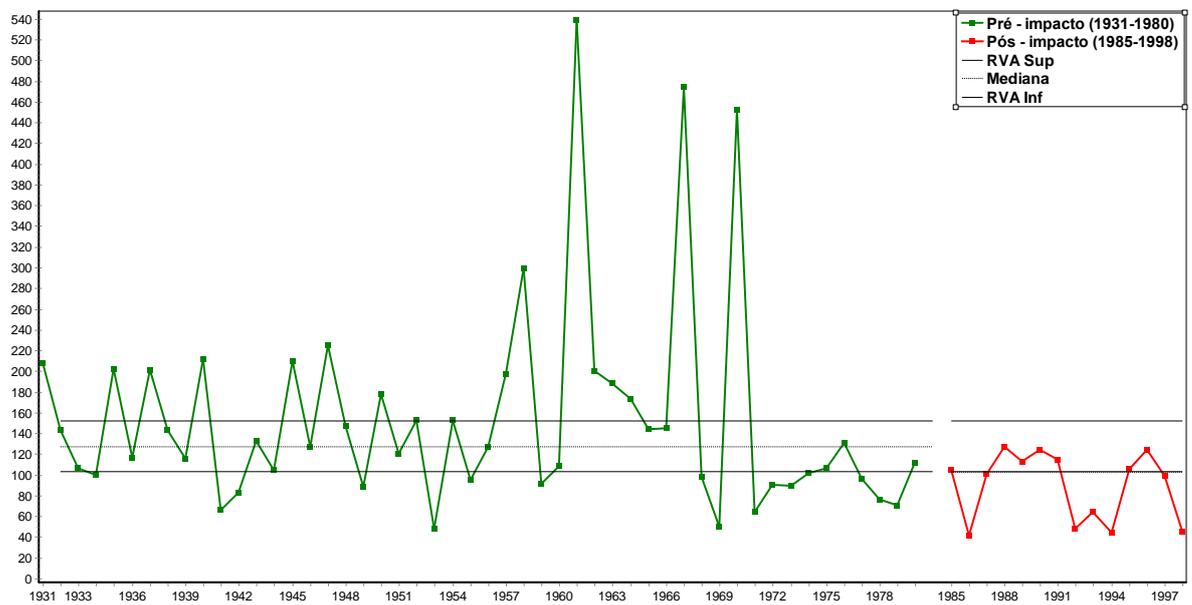


Figura 56. Série temporal da vazão máxima anual de 1-dia da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

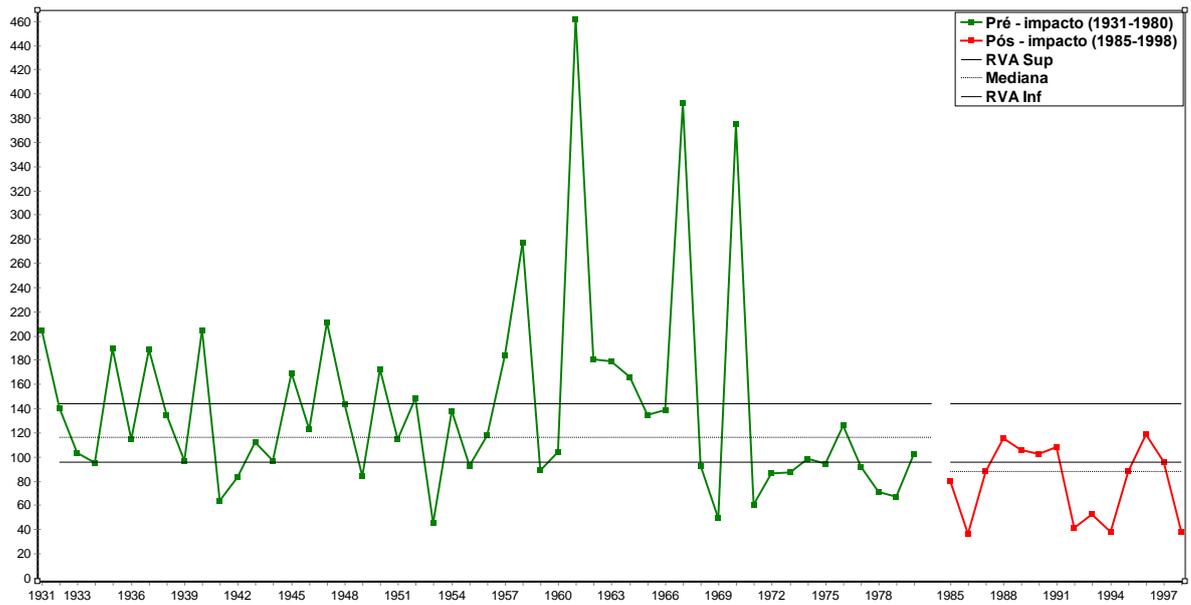


Figura 57. Série temporal da vazão máxima anual de 3-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

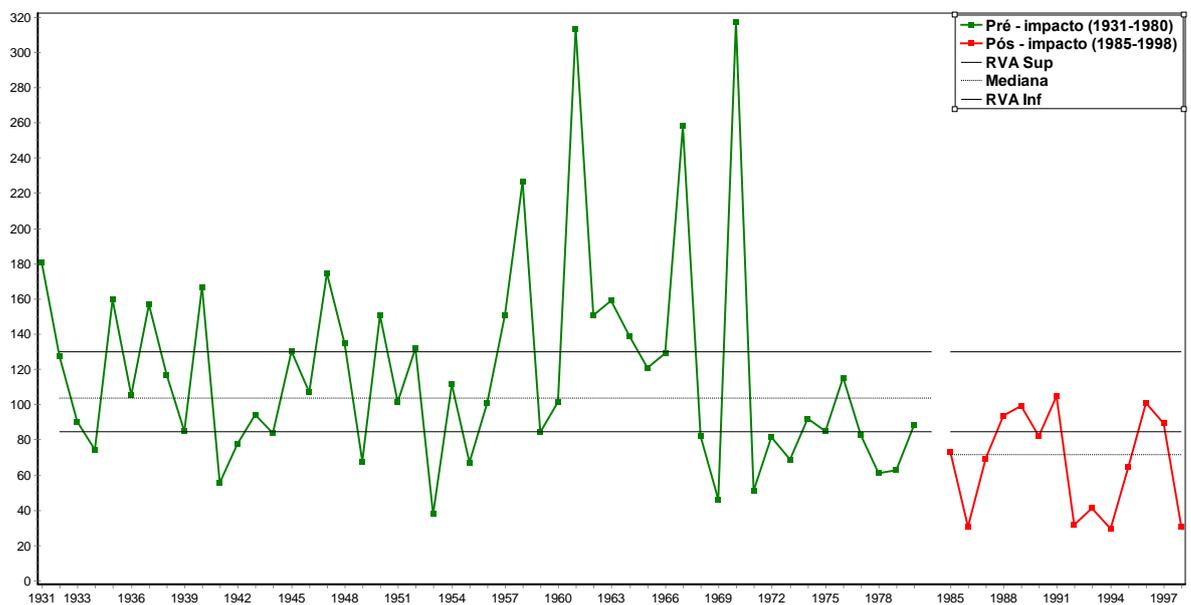


Figura 58. Série temporal da vazão máxima anual de 7-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

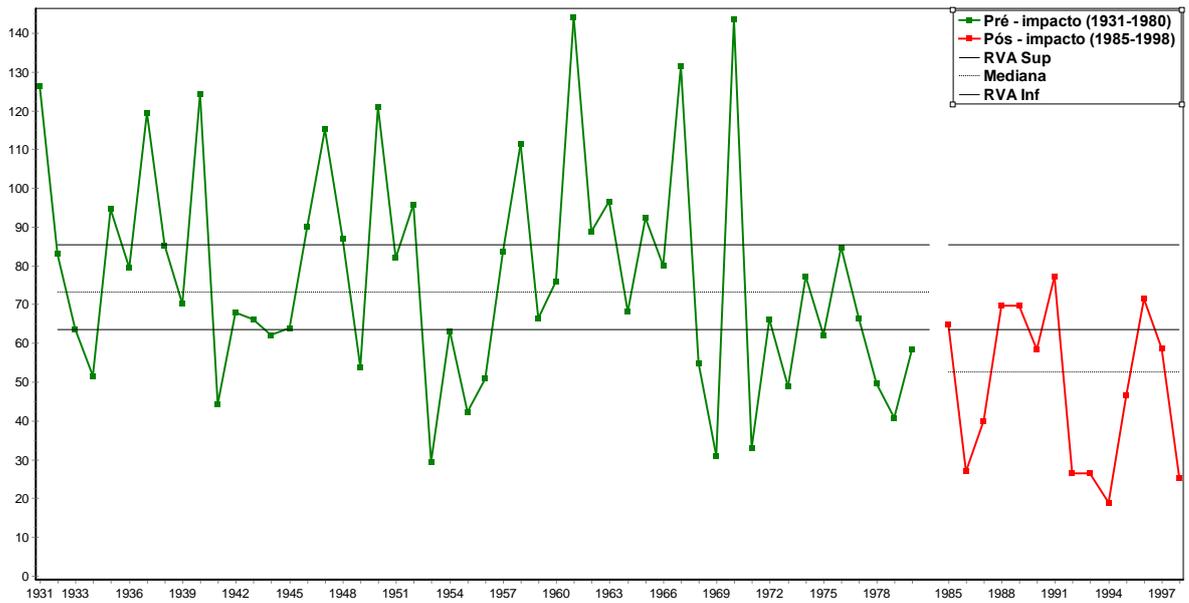


Figura 59. Série temporal da vazão máxima anual de 30-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

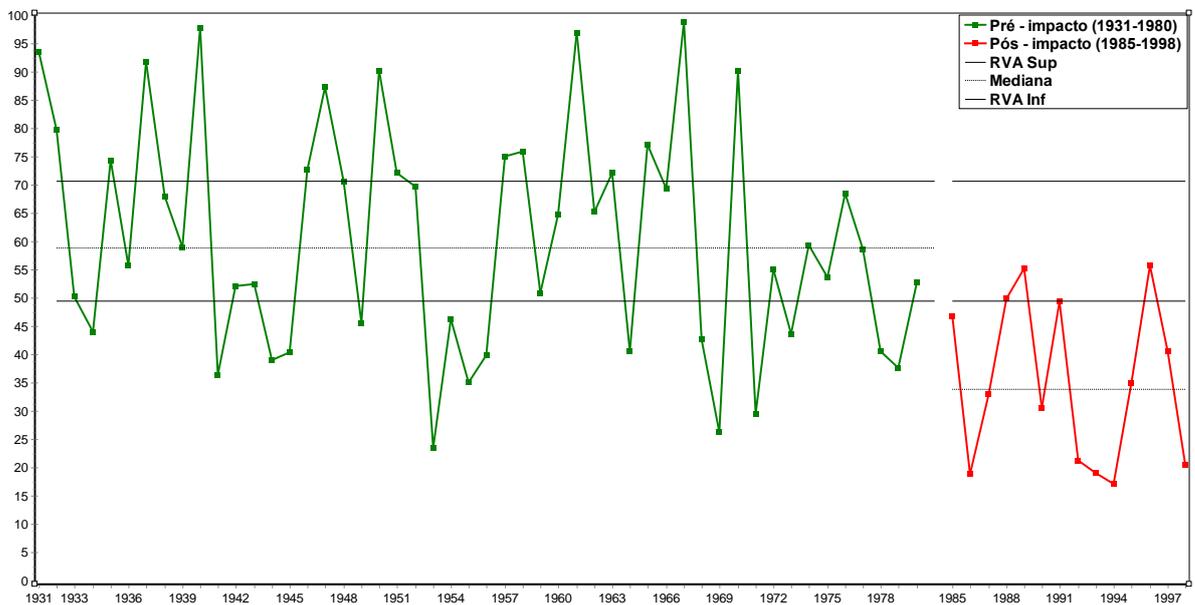


Figura 60. Série temporal da vazão máxima anual de 90-dias da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 3

Na Tabela 6 observa-se que a mediana das datas do calendário Juliano das vazões mínimas anuais se encontra no dia 273 no período pré-impacto e no dia 262 no período pós-impacto. Já para vazões máximas estas medianas se encontram no dia 30 no período pré-impacto e no dia 64 no período pós-impacto uma diferença de mais um mês. As possíveis influências no ecossistema seriam sobre as condições da água podendo determinar o ciclo de vida das espécies ou influenciar o grau de estresse ou mortalidade associada a condições extremas de água, tais como inundações ou secas [4,6].

Grupo 4

As medianas das durações baixo pulso, alto pulso e número de alto pulso no período pós-impacto são um pouco menores do que o período pré-impacto. Já a mediana do número baixo pulso no período pós-impacto é maior do que os do período pré-impacto além de menores coeficientes de variação, o que indica apenas uma pequena alteração hidrológica nas durações por causa da capacidade de armazenamento aumentar e diminuir rapidamente no reservatório da bacia hidrográfica do rio Jaguari, Figuras 61-64. Destacam-se com valores elevados os anos 1987 e 1993 para o número de baixo pulso, o ano de 1973 para a duração de baixo pulso, os anos de 1951 e 1961 para o número de alto pulso e os anos de 1961 e 1977 para a duração de alto pulso, todos esses anos ocorreram o fenômeno do El Niño de moderado a forte[44,45].

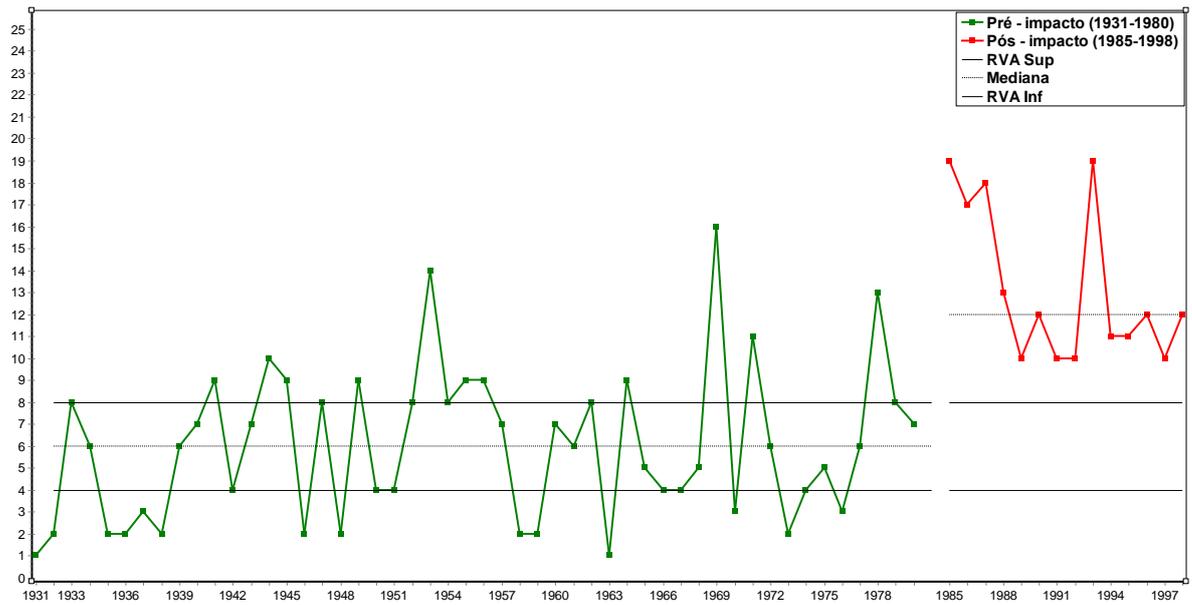


Figura 61. Série temporal do número de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

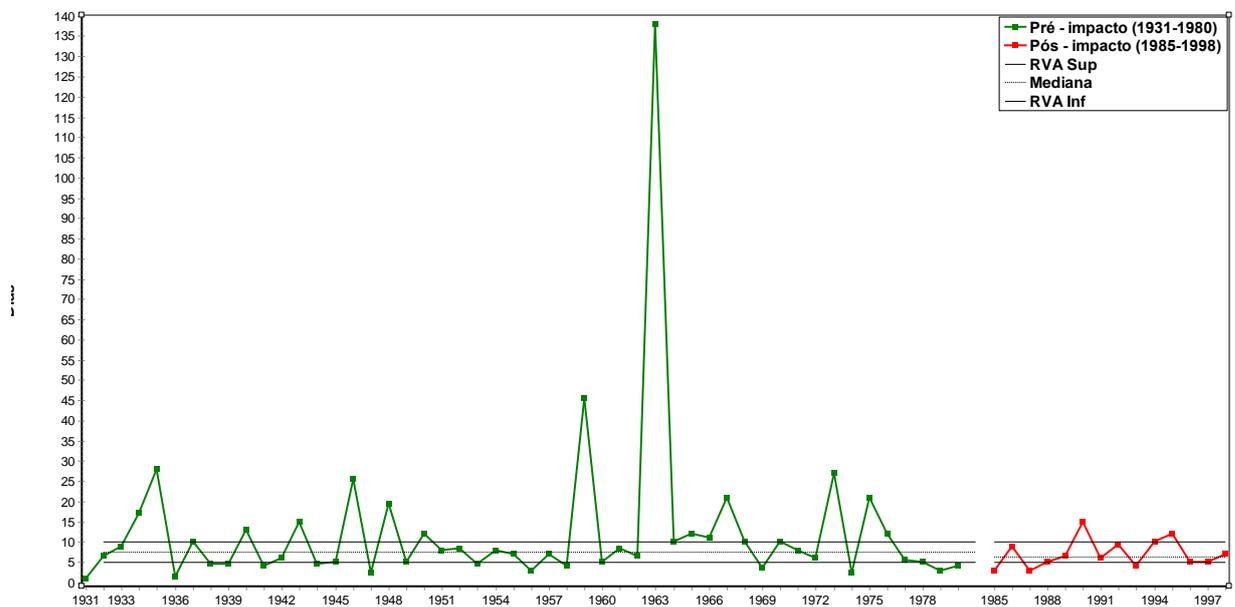


Figura 62. Série temporal da duração de baixo pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

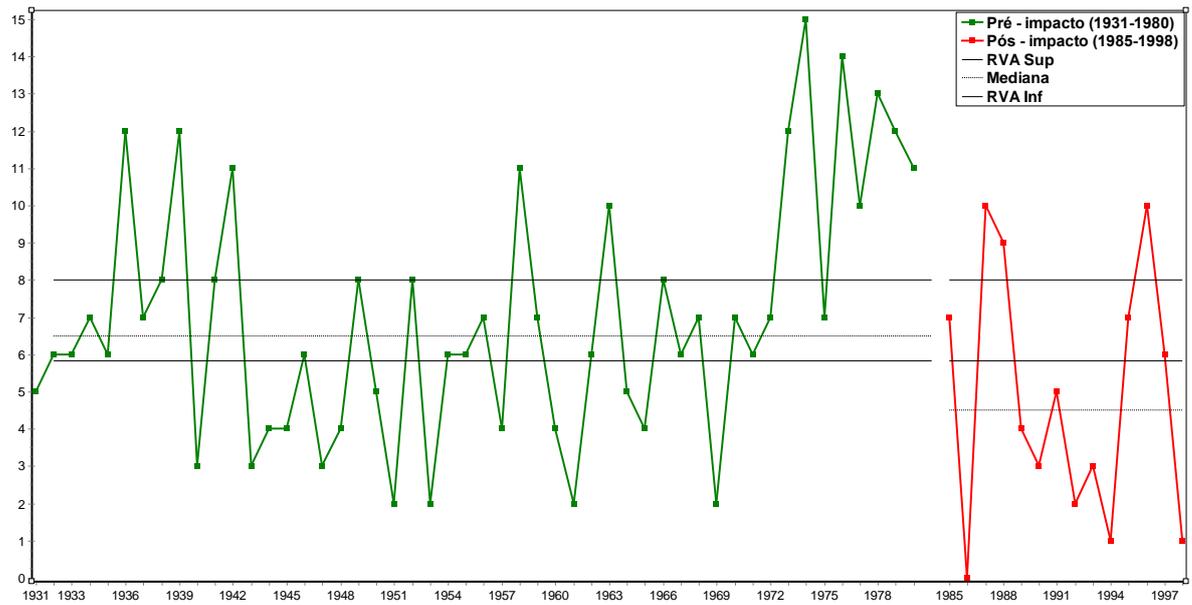


Figura 63. Série temporal do número de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

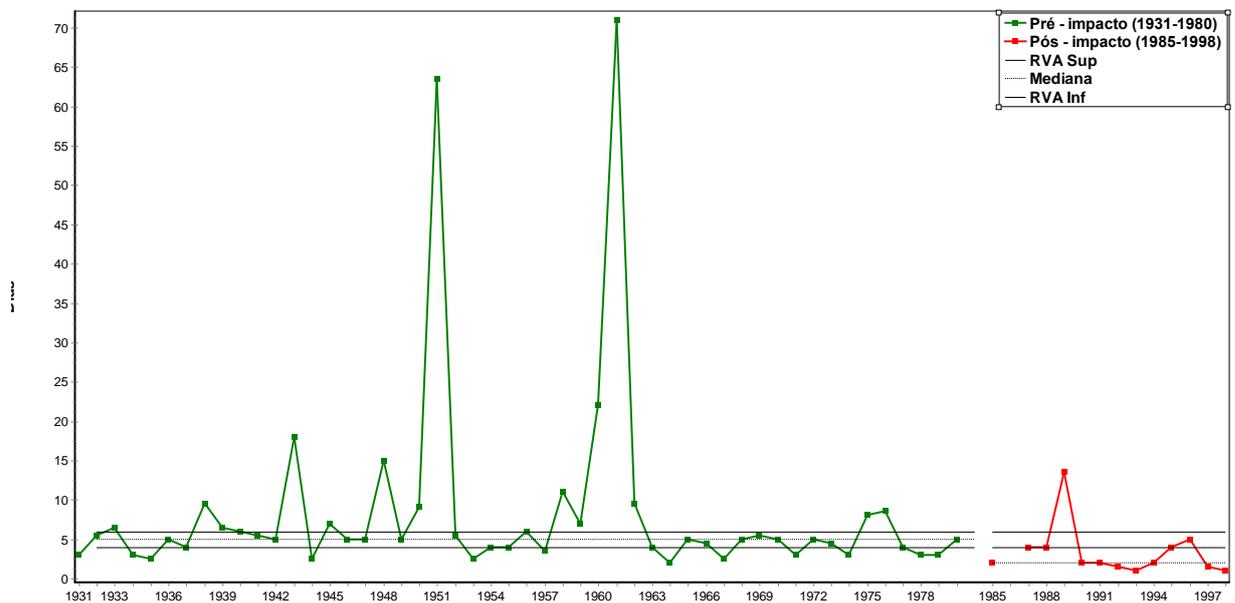


Figura 64. Série temporal da duração de alto pulso da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Grupo 5

As medianas da taxa de crescimento, taxa de queda e número de reversões aumentaram e os coeficientes de variação permaneceram estáveis para todo o período no reservatório da bacia hidrográfica do rio Jaguari, Figuras 65-67. Nota-se na taxa de crescimento e queda que o ano de 1976 assume valores discrepantes que pode ser justificado pela forte ocorrência de El Niño neste ano [44,45].

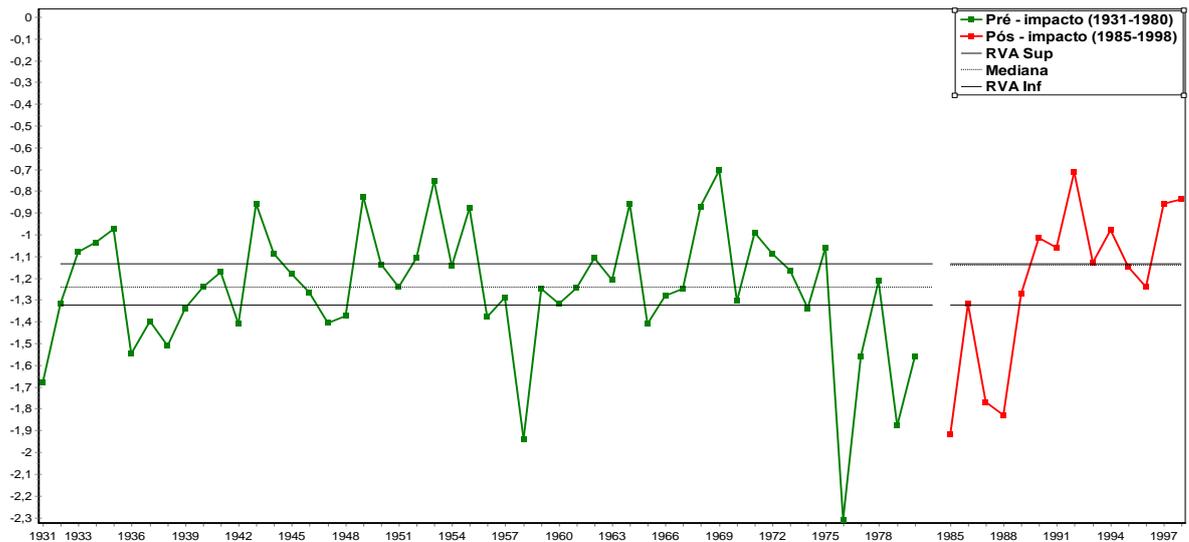


Figura 65. Série temporal da taxa de queda da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

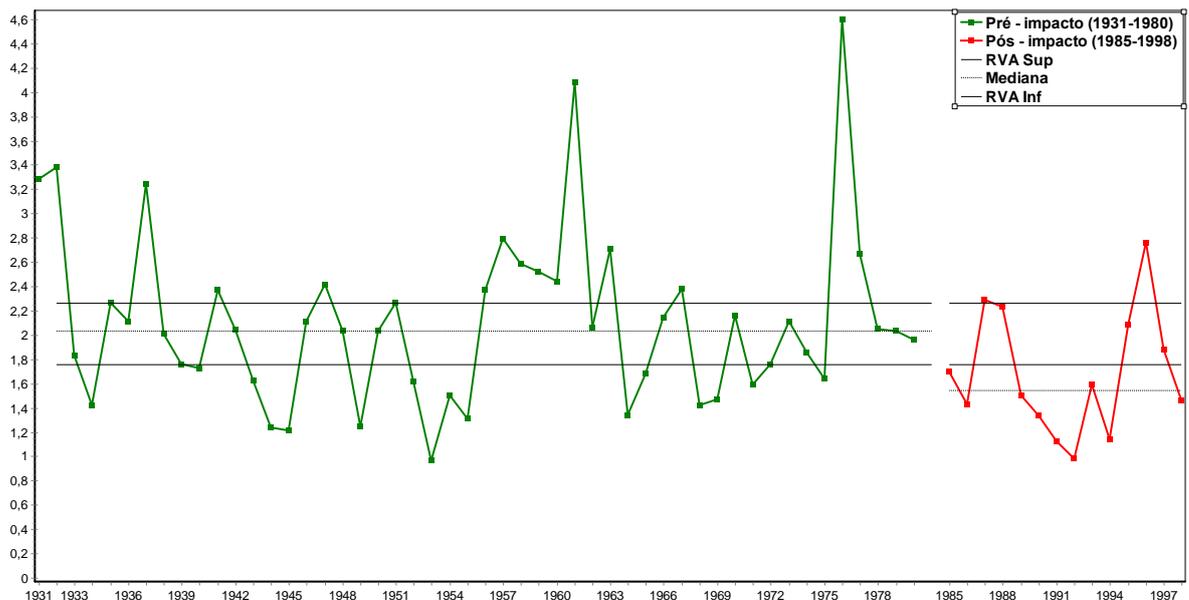


Figura 66. Série temporal da taxa de crescimento da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

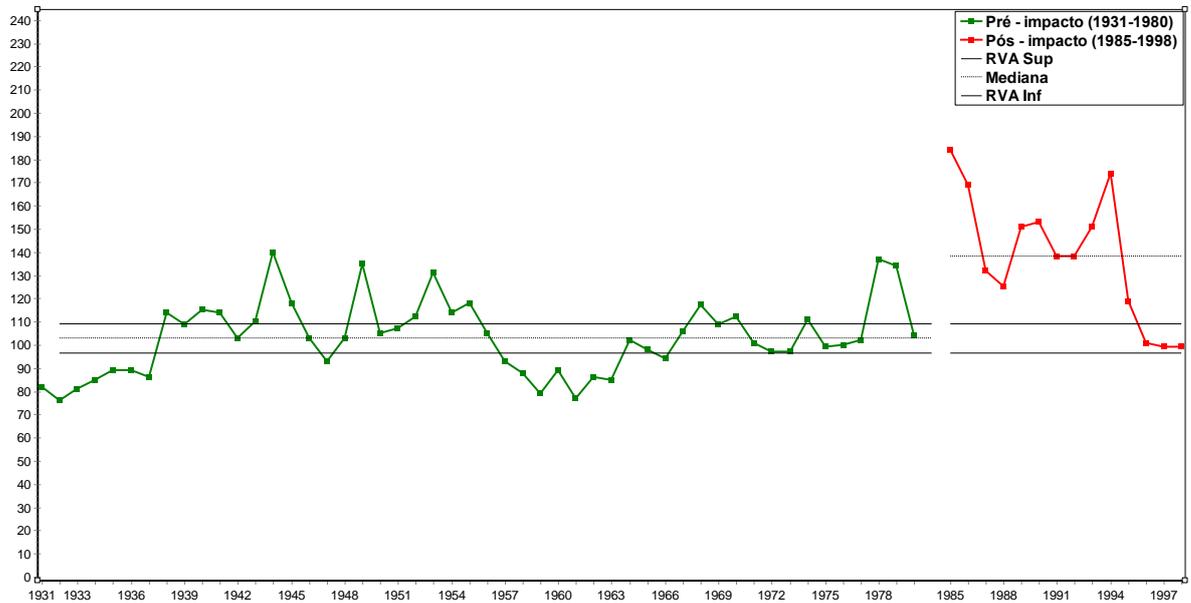


Figura 67. Série temporal dos números de reversões da bacia hidrográfica do rio Jaguari antes e depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira.

Resultados Obtidos para Fator de Alteração Hidrológica (HAc)

As Tabelas 9 e 10 mostram o comportamento dos fatores de alterações hidrológicas (HAc) proposto para as bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari para todas as categorias do RVA depois da construção do reservatório do Sistema Cantareira. As figuras de 68-73 ilustram os gráficos dos dois fatores HA e HAc para cada categoria do RVA para os 33 indicadores hidrológicos do IHA nas sub-bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari, da bacia hidrográfica do rio Piracicaba e verifica-se que o comportamento dos fatores de alteração hidrológica são semelhantes, o HAc é uma alternativa razoável pois é limitado no intervalo $[-1,1)$ e com a mesma interpretação do HA.

Tabela 9. Limites RVA e Fator de Alteração Hidrológico (HAc) da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológico (HAc)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	33,11	51,17	0,26	0	-0,17
Fevereiro	39,10	53,41	0,39	-0,40	-0,40
Março	33,17	53,91	0,33	-0,17	-0,27
Abril	26,68	35,22	0,39	-0,40	-0,56
Mai	21,54	27,70	0,36	-0,75	-0,56
Junho	19,09	23,64	0,26	-0,27	-0,56
Julho	16,94	21,13	0,30	-0,27	-0,56
Agosto	15,32	18,10	0,26	-0,27	-0,17
Setembro	13,93	17,27	0,13	-0,40	-0,17
Outubro	15,58	22,15	0,07	0,07	-0,27
Novembro	19,96	25,63	0,30	-0,17	-0,17
Dezembro	24,23	35,58	0,36	-0,43	0,13
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	8,52	12,46	0,30	0,00	-0,75
Mínimo 3-dia	9,96	13,01	0,33	-0,08	-0,75
Mínimo 7-dia	10,54	13,67	0,30	-0,08	-0,56
Mínimo 30-dia	12,03	15,58	0,18	0,07	-0,40
Mínimo 90-dia	15,83	18,95	0,26	-0,08	-0,40
Máximo 1-dia	77,32	121,00	-0,17	0,26	-0,27
Máximo 3-dia	74,06	117,60	-0,08	0,22	-0,27
Máximo 7-dia	68,54	106,60	0,22	0	-0,40
Máximo 30-dia	52,51	71,02	0,30	0	-0,75
Máximo 90-dia	43,24	57,71	0,22	0,13	-0,75
Número de vazão nula	0	0	0	0	0,00
Escoamento de base	0,38	0,45	0,07	-0,17	0,07
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	266,20	277	-0,17	-0,58	0,36
Dia Juliano máximo	38,08	74,46	0,18	-0,40	0,07
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	7	9	-0,37	-0,49	0,46
Duração de baixo pulso	3	7	0,15	-0,08	-0,01
Número de alto pulso	5	7,82	-0,13	-0,43	0,30
Duração de alto pulso	5	8,41	0,42	-0,20	-1,00
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,30	1,60	-0,27	-0,40	0,33
Taxa de queda	-1,29	-1,01	0,33	-0,56	-0,17
Número de reversão	116,20	131,60	-0,40	-0,40	0,36

Tabela 10. Limites RVA e Fator de Alteração Hidrológico (HA_c) da bacia hidrográfica do rio Jaguari.

Grupos IHA	Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológico (HA _c)		
	RVA Inf	RVA Sup	Inferior	Central	Superior
<u>Grupo 1</u>					
Janeiro	37,99	56,99	0,42	-0,67	-0,38
Fevereiro	43,76	64,25	0,42	-0,43	-0,64
Março	38,34	62,41	0,42	-0,67	-0,38
Abril	27,33	41,00	0,49	-1,00	-0,64
Mai	23,58	30,79	0,46	-0,67	-0,64
Junho	20,28	26,14	0,46	-1,00	-0,38
Julho	17,93	21,89	0,52	-1,00	-1,00
Agosto	15,33	18,36	0,46	-0,67	-0,64
Setembro	13,10	16,66	0,38	-0,67	-0,20
Outubro	14,74	20,59	0,28	-0,43	-0,06
Novembro	19,41	27,00	0,42	-0,25	-1,00
Dezembro	28,11	39,05	0,46	-0,43	-1,00
<u>Grupo 2</u>					
Mínimo 1-dia	9,50	11,69	0,52	-1,00	-1,00
Mínimo 3-dia	9,80	12,25	0,49	-0,67	-1,00
Mínimo 7-dia	10,15	12,93	0,49	-0,67	-1,00
Mínimo 30-dia	11,79	14,75	0,49	-0,67	-1,00
Mínimo 90-dia	15,74	19,44	0,49	-0,67	-1,00
Máximo 1-dia	103,7	152,00	0,22	0,16	-1,00
Máximo 3-dia	96,14	144,50	0,34	0,00	-1,00
Máximo 7-dia	84,71	130,30	0,34	0,00	-1,00
Máximo 30-dia	63,59	85,47	0,34	0,00	-1,00
Máximo 90-dia	49,53	70,74	0,42	-0,25	-1,00
Número de vazão nula	0	0	0	0,00	0,00
Escoamento de base	0,31	0,38	0,15	-0,67	0,22
<u>Grupo 3</u>					
Dia Juliano mínimo	267,80	280,3	0,28	-1,00	0,15
Dia Juliano máximo	32,83	76,17	-0,20	0,09	0,05
<u>Grupo 4</u>					
Número de baixo pulso	4	8	-1,00	-1,00	0,64
Duração de baixo pulso	5	10	-0,13	0,21	-0,35
Número de alto pulso	5,83	8	0,28	-0,34	-0,06
Duração de alto pulso	4	6	0,41	-0,23	-0,62
<u>Grupo 5</u>					
Taxa de crescimento	1,76	2,26	0,34	-0,25	-0,38
Taxa de queda	-1,32	-1,13	-0,20	-0,12	0,22
Número de reversão	96,49	109,20	-1,00	-0,25	0,42

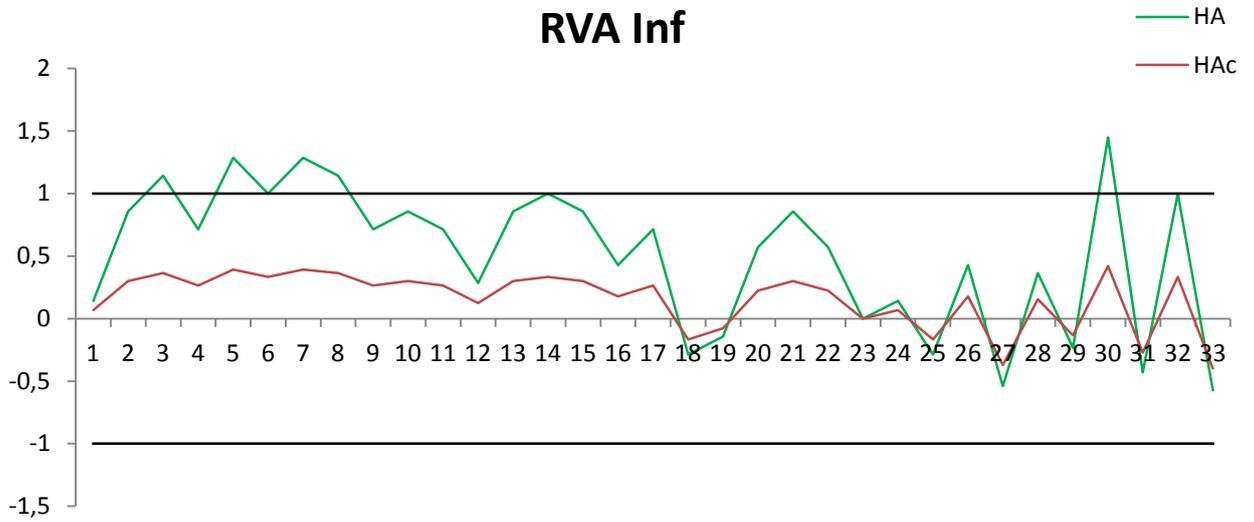


Figura 68. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA Inferior.

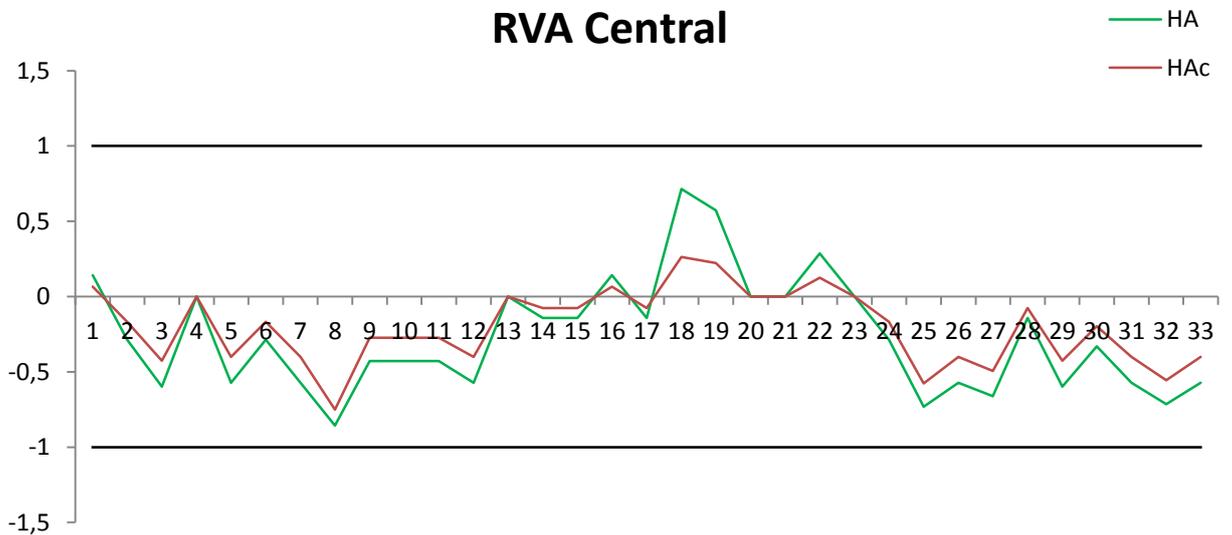


Figura 69. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA central.

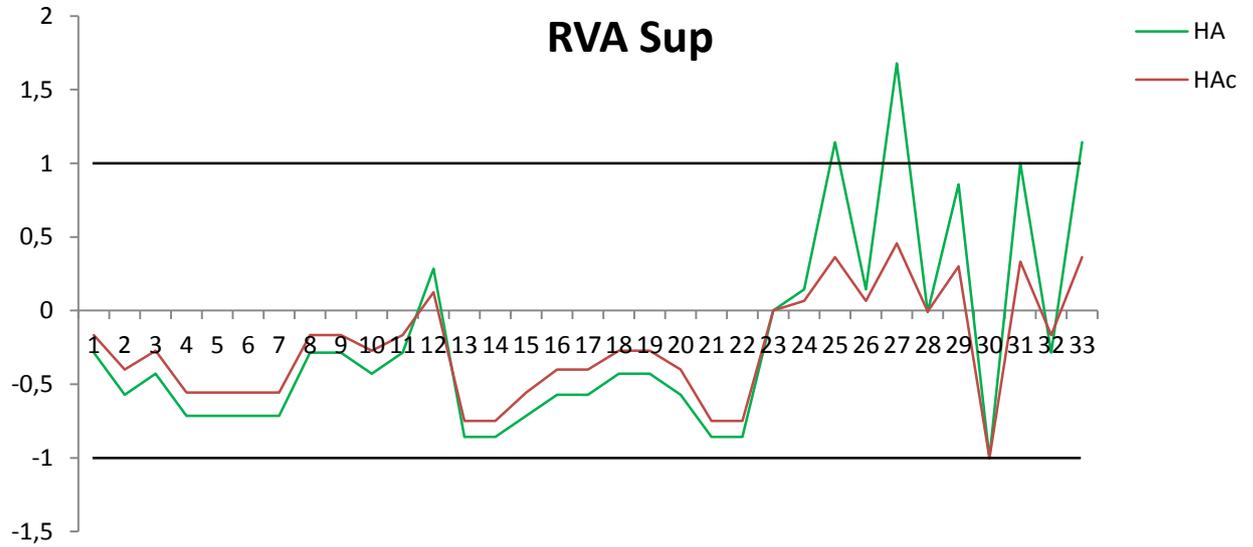


Figura 70. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Atibaia para categorias do RVA superior.

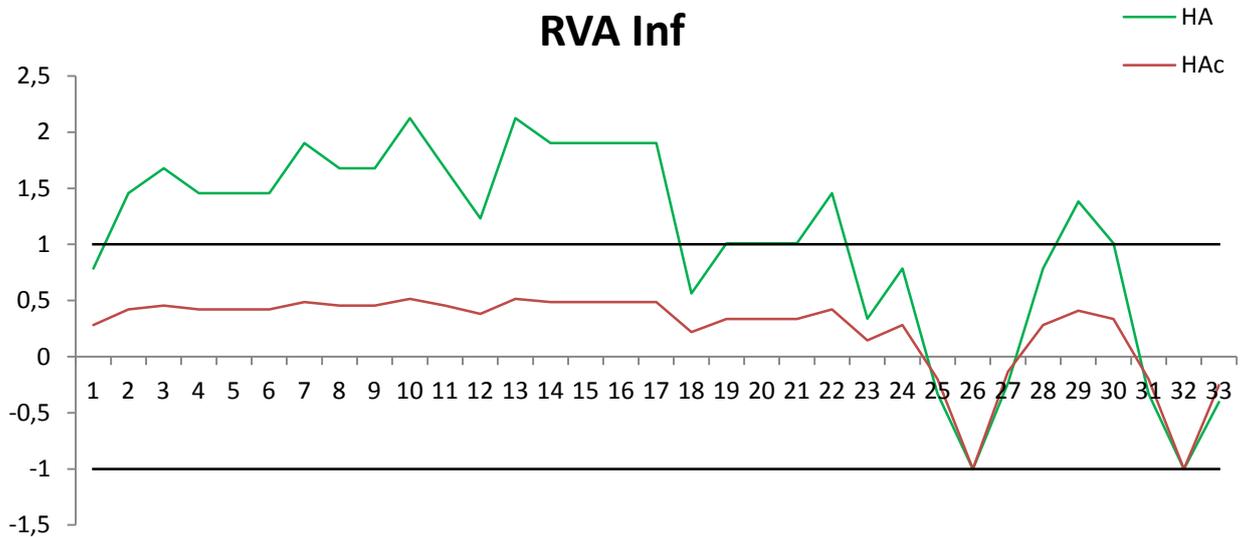


Figura 71. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguarí para categorias do RVA inferior.

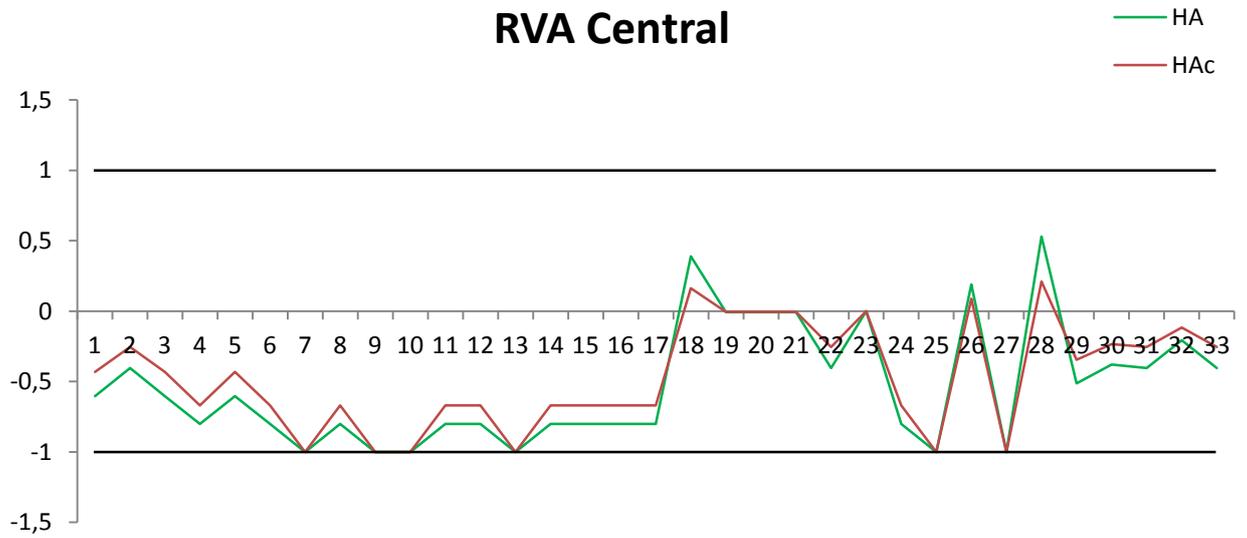


Figura 72. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA central.

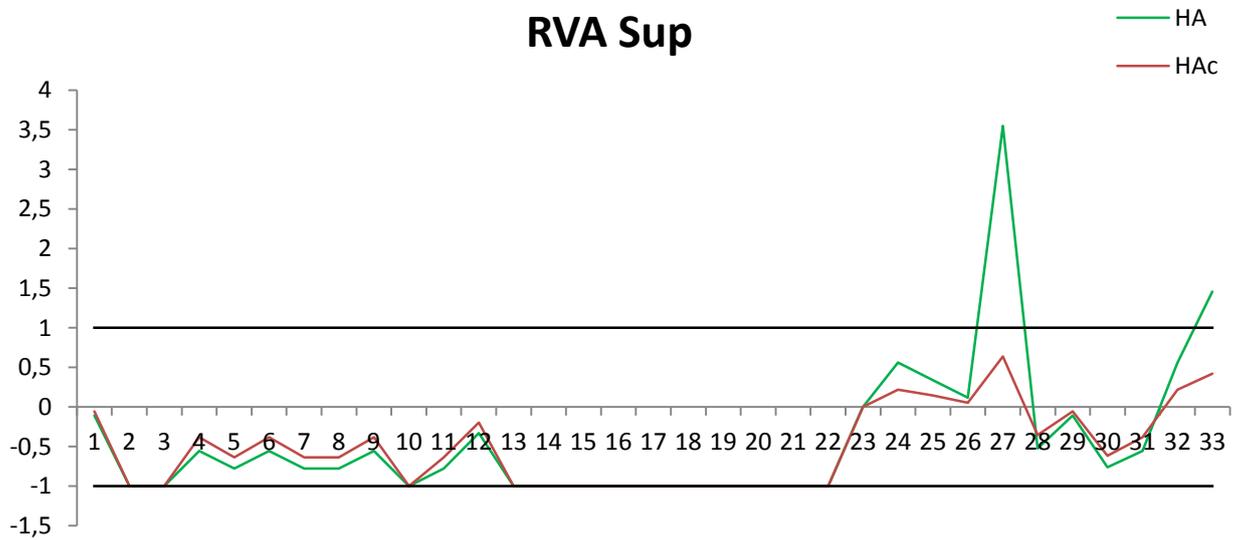


Figura 73. Fatores de alteração hidrológica HA x HAc da bacia hidrográfica do rio Jaguari para categorias do RVA superior.

Na tabela 11 mostra que a bacia hidrográfica do rio Jaguari tem maior número de indicadores hidrológicos do IHA com alteração hidrológica do que a bacia hidrográfica do rio Atibaia tanto para os grupos quanto para as diferentes faixas do RVA.

Tabela 11. Distância de Canberra dos indicadores hidrológicos do IHA nas diferentes faixas do RVA para as sub-bacias hidrográficas do rio Piracicaba.

Grupos	Bacia hidrográfica do rio Atibaia			Bacia hidrográfica do rio Jaguari		
	Inferior	Central	Superior	Inferior	Central	Superior
Grupo 1	3,42	3,59	3,96	5,18	7,89	6,94
Grupo 2	2,43	1,07	5,37	4,54	4,77	10,22
Grupo 3	0,34	0,98	0,43	1,20	1,09	0,20
Grupo 4	1,08	1,20	1,76	1,16	1,79	1,67
Grupo 5	1,01	1,36	0,86	1,20	0,62	1,02
Total	8,28	8,20	12,38	13,27	16,16	20,05

5. CONCLUSÕES

As influências da construção dos reservatórios do Sistema Cantareira sobre os regimes hidrológicos das sub-bacia hidrográfica do rio Piracicaba foram estudadas sistematicamente utilizando-se os métodos IHA e RVA. As seguintes conclusões podem ser resumidas para as bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari.

Os fatores hidrológicos inferior (RVA Inf) dos grupos 1 e 2 são positivos e acarretam alguns impactos no regime hidrológico após construções dos reservatórios nas bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari. A magnitude das condições da água mensal e a duração de condições extremas anuais diminuem, causando uma possível falta de umidade do solo para as plantas, habitat para os organismos aquáticos, água e alimentos para os animais terrestres, abastecimento de água para população e influência na temperatura da água e no nível de oxigênio. Já os fatores hidrológicos centrais e superiores são, na grande maioria, negativos, destacando-se o mês de maio para a bacia hidrográfica do rio Atibaia e todos os meses da bacia hidrográfica do rio Jaguari.

Os grupos 3, 4 e 5 apresentam comportamento semelhante para as bacias hidrográficas dos rios Atibaia e Jaguari. Porém, destacam-se os índices número de baixo pulso e número de reversão, ambos possuem fatores hidrológicos elevados, indicando um possível estado de seca frequente.

Propõe-se uma medida geral capaz de avaliar e comparar as alterações hidrológicas de todos os indicadores do IHA entre diferentes bacias hidrográficas baseada na distância de Canberra e utilizar o fator de alteração hidrológica (HAc) para mapear possíveis alterações hidrológicas das sub-bacias hidrográficas do rio Piracicaba causadas pelos vários fatores naturais e antrópicos, como uso do solo, cobertura vegetal, construção dos reservatórios, desflorestamento e incêndios florestais.

Como sugestão para resultados futuros, sugere-se a aplicação dos métodos IHA, RVA e o do fator de alteração hidrológica (HAc) para outras bacias hidrográficas do Brasil, como por exemplo, a bacia hidrográfica do rio São Francisco, que possui reservatórios responsáveis pela produção de energia elétrica, tendo uma grande importância regional nos pontos de vista ecológico, econômico e social.

6. REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, L. L. et al. Modelagem da interceptação na floresta nacional de Caxiuanã, no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**. Vol. 23, n. 3, p. 318-326, 2008.
- [2] VESTENA, L. R. et al. Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR. **Ambi-Agua**. Taubaté, Vol. 7, n. 3, p. 212-227, 2012.
- [3] MOURA, A. E. S. S. et al. Precipitação Efetiva nos Períodos Chuvoso e Pouco Chuvoso em um Fragmento de Mata Atlântica, Recife – PE. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 17, n. 4, p 7-16, 2012.
- [4] RICHTER, B. D. et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. **Conservation Biology**, v. 10, p. 1163-1174, 1996.
- [5] ROSENBERG, D.M. et al. Global scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction. **BioScience**, vol.50, n. 9, p. 746, 2000.
- [6] RICHTER, B. D. et al. How much water does a river need? **Freshwater Biology**, v. 37, p. 231-249, 1997.
- [7] Li, Z.; Zhang, Y.- K. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment** 22, 507-512, 2008.
- [8] Zhou, Y.; Zhang, Q.; Li, K.; Chen, X. Hydrological effects on water reservoirs on hydrological processes in the East River (China) basin: Complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. **Hydrological Processes**, 2012.
- [9] Tessier, Y.; Lovejoy, S.; Schertzer, D. Universal multifractals: Theory and observations for rain and clouds. **Journal of Applied Meteorology** 32, 223-250, 1993.

- [10] Kantelhardt, J. W.; Konczielny-Bunde, E.; Rybski, D.; Braun, P.; Bunde, A.; Havlin, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. **Journal of Geophysical Research** 111, D011106, 2006.
- [11] KRUSCHE, A. V. et al. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin, Brazil. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, p. 1117-1123, 1997.
- [12] MARTINELLI, L. A. et al. Effects of sewage on the chemical composition of Piracicaba River, Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 110, pp. 67-79, 1999.
- [13] MORAES, J. M. et al. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. **Water Resources Management**, v. 12, p. 295-311, 1998.
- [14] Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP. **Dossiê Sistema Cantareira**. Espaço das Águas, Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento, 2008.
- [15] TEODORO, V. L. I. et al. Conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, Araraquara (SP), n. 20, p. 137 -155, 2007.
- [16] BARRELLA, W. et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- [17] TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69p. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- [18] LIMA, W.P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ. USP, 1976.

- [19] HENRY-SILVA, G.G; CAMARGO, A.F.M. Impacto do lançamento de efluentes urbanos sobre alguns ecossistemas aquáticos do município de Rio Claro (SP). **Revista Ciências Biológicas e do Ambiente**, vol. 2, n. 3, p. 317-330, 2000.
- [20] OPERADOR Nacional do Sistema Elétrico – ONS. **Reservatórios**, 2014. Disponível em: < http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp >. Acesso em: 25 jun. 2014.
- [21] TUNDISI, J.G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos. Ed. Rima, p. 248, 2003.
- [22] TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943p. 2007.
- [23] RAWLS, W. J. et al. **Infiltration and soil water movement**. In: MAIDMENT, D. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill, p. 1 - 51,1996.
- [24] BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 120 p, 2006.
- [25] PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 88 p, 2003.
- [26] PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 183 p, 1997.
- [27] BAHIA, V. G.; CURI, N.; CARMO, D. N. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- [28] Agência Nacional de Águas. **A implementação da cobrança pelo uso de Recursos Hídricos e Agência de Água das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. Brasília, 112 p, 2007.

- [29] ANTONIE, Nelson. **Situação segue crítica na Cantareira**. São Paulo: Fotoarena/Folhapress, 18 mar. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <<http://noticias.band.uol.com.br/cidades/noticia/100000670603/nivel-cai-e-cantareira-passa-por-obras-para-retirada-de-volume-morto.html>>. Acesso em: 25 jun. 2014.
- [30] POSTEL, S. L. et al. Human appropriation of renewable fresh water. **Science**, vol. 271, p. 785–788, 1996.
- [31] ROSENBERG, D. M. et al. Large-scale impacts of hydroelectric development. **Environmental Reviews**, vol. 5, p. 27–54, 1997.
- [32] MORAES, J. M. et al. Análise do efeito da operação das barragens do Sistema Cantareira no regime hidrológico do rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 14, n.1, p. 41-51, 2009.
- [33] ARAUJO, L. S. **Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Piracicaba através da análise multifractal e análise de complexidade**. 2013. 97 f. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) – Departamento de Estatística e Informática, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.
- [34] RICHTER, B. D. et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. **Regulated Rivers: Research & Management**, v. 14, n. 4, p. 329–340, 1998.
- [35] JIAN, T et al. Suitable environmental flow release criteria for both human and riverine ecosystems: accounting for the uncertainty of flows. **Mathematical Problems in Engineering**. vol. 2012, article ID 704989, 2012. 14 p.
- [36] LANCE, G. N.; WILLIAMS, W. T. **Mixed-data classificatory programs. I. Agglomerative systems**. Austral. Comput. J. 1:15-20, 1967.
- [37] J. L. V. Villardón, **Análisis de Coordenadas Principales**, Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca, 2006.

- [38] Emran S.M., Ye N. Robustness of Canberra metric in computer intrusion detection. **Proceedings of the 2001 IEEE**, Workshop on Information Assurance and Security, United States Military Academy, West Point, New York, 5-6 June, 2001.
- [39] YANG, T. et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. **Hydrological Processes**, v. 22, pp. 3829-3843, 2008.
- [40] OPPERMAN, J. **Indicators of Hydrologic Alteration Analysis for the Patuca River**. 2006. Disponível em: <<http://www.conservationgateway.org/Files/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx#sthash.SsXvLIrr.dpuf>>. Acesso em: 28/02/2013.
- [41] OPPERMAN, J. Preliminary IHA Analysis for the Middle Fork Willamette River at Jasper OR. 2006. Disponível em: <<http://www.conservationgateway.org/Files/Pages/preliminary-ih-analysis-.aspx#sthash.41tOSOJ4.dpuf>>. Acesso em: 28/02/2013.
- [42] JENQ-TZONG, S.; FU-CHUN, W. Feasible diversion and instream flow release using range of approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol. 130, n. 5, p. 395-404, Sep./Oct. 2004.
- [43] ROLIM, G. S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.711-720, 2007
- [44] REPELEWSKI, C. F; HALPERT, M., 1996: Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. **Journal of Climate**, v.9, p.1043-1059.
- [45] KANE, R.P. Relationship of El-Niño Southern Oscillation and Pacific Sea Surface Temperature with Rainfall in Various Regions of the Globe. **Monthly Weather Review**, Vol. 125, N. 8, p.1792-1800, Ago.1997
- [46] GRIMM, A.; FERRAZ, S.E.T. & GOMES, J. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, 11:2863-2880, 1998.

[47] FONTANA, D.C. & BERLATO, M.A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. R. Bras. Agrometeorol., 5:127-132, 1997.