

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

MARIA EDUARDA RIBEIRO

**ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS NA BACIA
AFLUENTE À USINA CASTRO ALVES, RS**

CAXIAS DO SUL

2019

MARIA EDUARDA RIBEIRO

**ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS NA BACIA
AFLUENTE À USINA CASTRO ALVES, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção da
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II do curso de Engenharia
Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL

2019

MARIA EDUARDA RIBEIRO

**ANÁLISE DE ESTACIONARIEDADE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS NA BACIA
AFLUENTE À USINA CASTRO ALVES, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção da
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II do curso de Engenharia
Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovada em 1 de julho de 2019

Banca Examinadora

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin (Orientador)
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Tiago Panizzon
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Universidade Federal de Sergipe - UFS

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Taison Anderson Bortolin, orientador do presente trabalho, por todas as horas dedicadas na orientação, incentivo, apoio e paciência com as diversas dúvidas. Sem o seu acompanhamento e ensinamentos o desenvolvimento deste estudo não seria possível.

Aos meus pais Léa Regina Ribeiro de Souza e Luiz Carlos Silva de Souza, pelo amor incondicional e auxílio, sem os quais não teria chegado até aqui.

Ao Kauê Pelegrini, pela paciência, companheirismo, constante apoio e incentivo para iniciar o curso de Engenharia Ambiental.

À amiga de longa data Karine Galisteo Diemer Lopes, pelas relevantes discussões em relação aos testes estatísticos, apoio nos momentos difíceis e nunca me deixar desistir.

Às colegas e amigas Daniela Feltes, Joana Eberle e Thaís Turcatel, por tornarem essa jornada mais leve com a sua amizade.

Ao Volnei Dal Bosco, Engenheiro Agrônomo do SAMAE, por todo auxílio na etapa de alteração do uso do solo. E aos colegas Amanda Cledes e Guilherme Lazzari, pelos ensinamentos e ajudas com o ArcGIS.

À Professora Gisele Cemin, pelo auxílio com o IDRISI. Aos demais Professores, que ao longo do curso contribuíram para meu crescimento acadêmico.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar estatisticamente as séries hidrológicas da bacia afluenta ao reservatório da Usina Castro Alves. Utilizaram-se dados de seis estações pluviométricas localizadas dentro ou próximas da bacia, obtidos através do portal Hidroweb da ANA. A partir desses dados, foi calculada a série de precipitações média da bacia pelo método de Thiessen. Os dados de vazões naturais afluentes à UHE foram obtidos do ONS. Ambas as séries abrangem o período de 1945 a 2017. Inicialmente foi realizada uma análise exploratória, incluindo estatística descritiva e análise visual de gráficos de média e mediana móveis de 10 anos e de volumes acumulados, além de regressões de LOWESS, gráficos RAPS e curvas de permanência. A verificação da não-estacionariedade foi realizada nas séries completas e nos períodos antes e após 1970. As séries foram analisadas com base nos testes paramétricos t-Student e F-Snedecor, e nos testes não-paramétricos Coeficiente de Correlação de Spearman, Cox-Stuart, Mann-Whitney, Mann-Kendall e Pettitt. A avaliação da alteração do uso do solo, na bacia de contribuição da UHE Castro Alves, foi realizada com os dados disponibilizados pelo MapBiomas, para os anos de 1993, 2003, 2013, 2016 e 2017. Em conjunto foram analisados dados diários de vazões, obtidos do ONS. O desempenho do reservatório da UHE foi avaliado através de simulação no *software* Acquanet e cálculo dos índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema. Foram consideradas duas demandas: $Q_{\min}$ estabelecida pela FEPAM e $Q_{\min}$ de operação da UHE. Como resultado conclui-se que as séries completas de chuva e vazão são não-estacionárias, assim como o período antecedente a 1970. Já o período posterior a 1970 apresentou indícios significativos de estacionariedade e homogeneidade para ambas as variáveis. Há uma alteração significativa no uso do solo da bacia, com redução da vegetação natural e aumento de áreas destinadas a agropecuária, com consequente aumento das vazões máximas e redução das vazões mínimas. Quanto ao desempenho do reservatório, o mesmo apresenta alta confiabilidade para atendimento da demanda ambiental e baixa vulnerabilidade. Já para atendimento da $Q_{\min}$ de operação da UHE, a confiabilidade do sistema diminui e a vulnerabilidade aumenta. Os índices de resiliência para ambas as demandas foram reduzidos.

Palavras-chave: Estacionariedade; Homogeneidade; Séries Hidrológicas

ABSTRACT

The present work aims to analyze statistically the hydrological series of the basin affluent to the reservoir of the Castro Alves Plant. Data from six pluviometric stations located inside or near the basin were obtained through the Hidroweb portal of ANA. From these data, the mean precipitation series of the basin was calculated by the Thiessen method. The streamflow data affluent to the HPP were obtained from the ONS. Both series cover the period from 1945 to 2017. Initially, an exploratory analysis was performed, including descriptive statistics and visual analysis of 10-year moving average, median graphs and accumulated volumes, as well as LOWESS regressions, RAPS graphs and permanence. The non-stationarity check was performed in the complete series and in two periods obtained from the data referring to the period before and after the year of 1970. The series were analyzed based on the t-Student and F-Snedecor parametric tests, and on the non-parametric tests Coefficient of Correlation of Spearman, Cox-Stuart, Mann-Whitney, Mann-Kendall and Pettitt. The evaluation of the land use change in the contribution basin of the Castro Alves HPP was carried out using the data provided by the Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura do Solo do Brasil (MapBiomias) for the years 1993, 2003, 2013, 2016 and 2017. Together, daily flow data, obtained from the ONS, were analyzed. The performance of the HPP reservoir was evaluated through simulation in the Acquanet software and calculation of reliability, resilience and vulnerability indexes of the system. Two demands were considered: $Q_{\min}$ established by FEPAM and $Q_{\min}$ of the operating HPP. As a result, it is concluded that the complete series of rainfall and flow are non-stationary, as well as the period before 1970. The period after 1970 showed significant signs of stationarity and homogeneity for both variables. There is a significant change in the use of the soil of the basin, with reduction of the natural vegetation and increase of areas destined to agriculture, with consequent increase of the maximum flows and reduction of the minimum flows. Regarding the performance of the reservoir, it presents high reliability to meet the environmental demand and low vulnerability. Attempting to attend the $Q_{\min}$ of operation of the HPP, the reliability of the system decreases and the vulnerability increases. The resilience indices for both demands were reduced.

Key-words: Stationarity; Homogeneity; Hydrological Series

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão dos subsistemas do Sistema Interligado Nacional	14
Figura 2 - Gráfico exemplificando uma série temporal estacionária e uma não estacionária	18
Figura 3 - Fluxograma metodológico	34
Figura 4 - Localização da Usina Castro Alves	35
Figura 5 – Delimitação e localização da bacia de contribuição da UHE Castro Alves	36
Figura 6 – Localização das estações pluviométricas na bacia de contribuição da UHE Castro Alves	38
Figura 7 - Gráfico da disponibilidade temporal das estações pluviométricas selecionadas	39
Figura 8 - Rede de fluxo montada no Software Acquanet 2013	43
Figura 9 – Áreas de influência das estações pluviométricas	46
Figura 10 - Precipitação média mensal da bacia de contribuição da UHE Castro Alves	47
Figura 11 - Precipitações máximas e mínimas mensais da bacia de contribuição da UHE Castro Alves	47
Figura 12 - Precipitação total anual da bacia de contribuição da UHE Castro Alves	48
Figura 13 - Precipitações trimestrais da bacia de contribuição da UHE Castro Alves	48
Figura 14 - Gráfico da regressão LOWESS e média e mediana móveis de 10 anos para as precipitações totais anuais	50
Figura 15 - Gráfico RAPS para as precipitações totais anuais	50
Figura 16 - Gráfico da regressão LOWESS e média e mediana móveis de 10 anos para as vazões médias anuais	52
Figura 17 - Gráfico RAPS para as vazões médias anuais	52
Figura 18 - Vazões acumuladas	53
Figura 19 - Curva de permanência para os períodos 2 e 3	54
Figura 20 - Ponto de mudança da série de precipitações totais anuais	55
Figura 21 – Precipitação mensal para o período de 1945 a 2017	57
Figura 22 - Precipitação mensal para o período de 1945 a 1969	57
Figura 23 - Precipitação mensal para o período de 1970 a 2017	58

Figura 24 - Ponto de mudança da série de vazões médias anuais	59
Figura 25 - Vazões afluentes para o período de 1945 a 2017	60
Figura 26 - Vazões afluentes para o período de 1945 a 1969.....	61
Figura 27 - Vazões afluentes para o período de 1970 a 2017.....	61
Figura 28 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 1993	62
Figura 29 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2003	63
Figura 30 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2013	63
Figura 31 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2016	64
Figura 32 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2017	64
Figura 33 - Curva de permanência para os períodos antes e após início da operação da UHE Castro Alves	66
Figura 34 - Vazões máximas mensais para o período de 1993 a 2016	67
Figura 35 - Vazões mínimas mensais para o período de 1993 a 2016	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas.....	38
Tabela 2 – Períodos que foram realizadas as análises.....	41
Tabela 3 - Simulações realizadas e respectivas demandas.....	43
Tabela 4 - Elementos utilizados na simulação	43
Tabela 5 - Indicadores fisiográficos obtidos para a bacia de contribuição da UHE Castro Alves	45
Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos dados de precipitações totais anuais: média ($\bar{X}$); mediana (X_{md}), desvio padrão (S^2); coeficiente de variação (cv)	49
Tabela 7 - Estatísticas descritivas dos dados de vazões mensais: média ($\bar{X}$); mediana (X_{md}), desvio padrão (S^2); coeficiente de variação (cv)	51
Tabela 8 - Resultados obtidos na análise estatística da série de precipitações totais anuais.....	56
Tabela 9 - Resultados obtidos na análise estatística da série de vazões médias mensais.....	59
Tabela 10 - Uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para os anos de 1993, 2003, 2013, 2016 e 2017	65
Tabela 11 - Índices de desempenho do reservatório da UHE Castro Alves.....	68

Sumário

1 Introdução	10
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3 Referencial Teórico	14
3.1 Setor Elétrico Brasileiro	14
3.2 Operação de Reservatórios	15
3.3 Hidrologia Estatística	16
3.3.1 Processos Estocásticos	17
3.3.2 Estacionariedade e Homogeneidade	18
3.3.3 Tendências em Séries Hidrológicas	19
3.3.4 Análise Exploratória dos Dados	27
3.3.5 Estudos Anteriores	28
3.4 Alteração no Uso do Solo	30
3.5 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório	32
4 Materiais e Métodos	34
4.1 Área de Estudo	35
4.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica.....	36
4.3 Caracterização do Regime de Chuvas	37
4.4 Vazões Naturais Afluentes.....	40
4.5 Análise Exploratória dos Dados.....	40
4.6 Aplicação dos Testes Estatísticos	41
4.7 Alteração do Uso do Solo e Dados Diários.....	41
4.8 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório	42
5 Resultados e Discussão	45
5.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica.....	45
5.2 Caracterização do Regime de Chuvas	46
5.3 Análise Exploratória dos Dados.....	49
5.3.1 Série de Precipitações	49
5.3.2 Série de Vazões	51
5.4 Aplicação dos Testes Estatísticos	55

5.4.1 Série de Precipitações	55
5.4.2 Série de Vazões	58
5.5 Alteração do Uso do Solo e Dados Diários	62
5.6 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório	68
6 Conclusões.....	70
Referências	72

1 Introdução

No Brasil, um dos principais usos da água é para a geração de energia elétrica, fato decorrente da elevada disponibilidade de potencial hidráulico no País. Devido ao crescimento econômico e industrial, a exploração dos recursos hídricos se intensificou, aumentando a sua demanda e, por consequência, acarretando na redução da disponibilidade hídrica e gerando concorrência e conflitos entre os diferentes usos da água (MENDES, 2012). Por ser um País que apresenta cursos d'água com grandes vazões, a construção de hidrelétricas, para geração de energia, se torna uma solução economicamente mais viável.

A geração de energia pelas usinas hidrelétricas (UHE) depende da vazão de água disponível para movimentar as turbinas. A vazão que chega até a usina é chamada de vazão afluente, e é decisiva na avaliação de energia disponível. Esta vazão é dependente das condições hidrológicas da bacia, bem como dos aproveitamentos existentes a montante. Para o funcionamento da usina se faz necessária a construção de uma barragem, visando reter grandes quantidades de água, e, assim criando um reservatório.

O princípio da construção e operação de reservatórios está baseado no desenvolvimento de reservas nos períodos de excedente hídrico, para posteriormente ser utilizado em períodos de escassez. Tais empreendimentos podem atender múltiplos usos da água, como abastecimento público, geração de energia, irrigação, controle de cheias e navegação (BRAVO, 2010). A operação dos reservatórios para atender a demanda energética pode provocar impactos, e ser impactada por outras atividades tais como a irrigação e o abastecimento público. Portanto, este setor é de extrema importância na gestão dos recursos hídricos (MENDES, 2012). Atualmente, no Brasil, ocorre um processo de aperfeiçoamento da gestão compartilhada destes recursos, sendo os comitês de bacia e conselhos de usuários os responsáveis pela alocação de água para usos múltiplos. Nesse contexto há uma exigência maior na melhoria dos processos de operação dos reservatórios (ASFORA & CIRILO, 2005).

No Brasil, a geração e transmissão de energia elétrica é realizada pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. A coordenação e controle da operação do SIN é realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sob a fiscalização e regulação da

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (ANEEL, 2008). A geração de energia no País depende fortemente das hidrelétricas, o que envolve riscos de oferta, visto que o insumo das usinas é a vazão dos rios, variável esta que depende do clima, do uso do solo e outros fatores (BRAVO, 2010).

No setor elétrico se utiliza o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria no rio caso não houvesse ações antrópicas na sua bacia de contribuição. A reconstituição de séries de vazões naturais tem sido alvo de interesse do ONS e das instituições envolvidas na gestão de recursos hídricos. Por permitir representar as condições naturais da bacia, a vazão natural é considerada uma peça fundamental no planejamento dos recursos hídricos (OLIVEIRA, et al., 2008). No Brasil, a energia proveniente de hidrelétricas contribui com cerca de 65,2% para o total de energia gerada no país (BEN, 2018). Por consequência, o planejamento e geração de energia do SIN estão correlacionados com a disponibilidade de água nos reservatórios das usinas, bem como com as afluições que chegam até estes reservatórios. A fim de que esse planejamento se torne efetivo devem ser consideradas as incertezas das afluições futuras (COSSICH et al., 2015).

O uso e ocupação do solo de forma desordenada acarreta em diversos impactos negativos nas bacias hidrográficas, dentre os quais pode-se citar o decréscimo da velocidade da água e redução da disponibilidade hídrica, consequência do assoreamento dos corpos hídricos (SOUZA, et al., 2017). Estes efeitos causados pela alteração do uso e ocupação do solo, bem como mudanças climáticas, podem vir a interferir na estacionariedade das séries históricas, desta forma interferindo na geração de energia.

A verificação da alteração em séries temporais de dados hidrológicos é de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos, tendo em vista que é subsídio para a tomada de decisões em relação aos usos da água. Os projetos, referentes a sistemas de recursos hídricos, partem do pressuposto que a sequência de dados de vazão e precipitação permanecem constantes ao longo do tempo, ou seja, são estatisticamente estacionárias. No entanto, esta suposição pode não ser verdadeira, já que estas séries dependem da influência de fatores naturais e antrópicos de uma determinada região, como clima e uso do solo. Portanto, há uma dada incerteza nos modelos que preveem as vazões. Estas mudanças no regime de vazões naturais e precipitação podem interferir na disponibilidade hídrica, e,

consequentemente, afetar o desempenho do reservatório para geração de energia (ALEXANDRE et al., 2010; BRAVO, 2010).

No Rio das Antas está localizada a UHE Castro Alves, situada a leste do município de Nova Roma do Sul. A usina possui uma área de reservatório de 5 km², sua operação teve início em 2008, com uma potência instalada de 130 MW e energia assegurada de 64 MW médios (CERAN, 2018).

Nesse contexto, pela ausência de dados referentes a esta alteração no regime de vazões e precipitações, para o empreendimento em questão, neste trabalho apresenta-se um estudo do comportamento das vazões naturais afluentes à Usina Castro Alves, e de dados de postos pluviométricos da bacia de contribuição da mesma, com o intuito de analisar se há mudanças significativas ao longo do tempo. Também é possível avaliar se as alterações estão influenciando o desempenho do reservatório e, então, auxiliar na melhor operação da usina. Além disso, também será realizada uma avaliação das alterações que ocorrem no uso e ocupação do solo e sua interferência no comportamento da série de vazões afluentes.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Analisar estatisticamente as séries hidrológicas da bacia afluenta ao reservatório da Usina Castro Alves, RS.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a estacionariedade e a homogeneidade da precipitação registrada na bacia de contribuição da UHE Castro Alves.
- Avaliar a estacionariedade e a homogeneidade da série histórica de vazão natural afluenta à UHE Castro Alves.
- Avaliar se a alteração do uso do solo tem influência ou não nestes resultados.
- Verificar como o desempenho do reservatório é alterado em função das séries de vazões naturais.

3 Referencial Teórico

3.1 Setor Elétrico Brasileiro

Por apresentar condições hídricas favoráveis, a base do suprimento energético no Brasil são as hidrelétricas, estando estas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas em diferentes regiões (MÜLLER et al., 1995; ONS, 2018a). De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG), há no País 7.136 empreendimentos em operação, totalizando aproximadamente 160 GW, sendo 102 GW provenientes de fonte hídrica. A energia oriunda do potencial hidráulico conta com 1.337 empreendimentos (CGH, PCH e UHE), correspondendo a 63,8% da potência instalada no País. As Usinas Termelétricas (UTE) representam 25,81%, e o restante é proveniente de energia eólica, fotovoltaica e termonuclear (ANEEL, 2018).

A geração e transmissão de energia no País é realizada pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange a maior parte do território brasileiro. O SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte (ANEEL, 2008). Os subsistemas, inicialmente, foram desenvolvidos de forma independente, desarticulados um do outro. No entanto, devido ao comportamento hidrológico distinto das diferentes bacias tais subsistemas foram interligados, visando o sinergismo das regiões (KELMAN et al., 2006). Na Figura 1 estão apresentados os quatro subsistemas do SIN.

Figura 1 - Divisão dos subsistemas do Sistema Interligado Nacional



Fonte: Detzel, 2011

A coordenação e operação das instalações de geração e transmissão do SIN são de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), estando o mesmo sob a fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O ONS tem como objetivos promover a otimização da operação do sistema eletroenergético, garantir o acesso à rede de transmissão pelos agentes do setor elétrico e contribuir para a expansão do SIN (ONS, 2018b). A ANEEL foi instituída pela Lei nº 9.427 de 1996, tendo como objetivo realizar a fiscalização e regulação da produção, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica no País.

De acordo com Zambon (2008), a principal característica do sistema operacional brasileiro de energia elétrica é aproveitar o potencial hídrico do País, reduzindo o uso de termelétricas. Esta ação visa minimizar o custo de produção de energia elétrica. No entanto, a água armazenada nos sistemas pode ser utilizada até um limite de segurança, pois o volume de água disponível depende das vazões afluentes aos reservatórios, bem como da precipitação (ZAMBON, 2008).

Para garantir a demanda de eletricidade, o ONS faz uso de modelos para gerenciar os reservatórios das usinas, entretanto a operação destes sistemas ainda não trata de forma adequada o uso múltiplo das águas (BRANDÃO, 2004). A operação do SIN é de grande complexidade, sendo necessária a utilização de técnicas de otimização capazes de tratar de forma adequada os elementos envolvidos na geração de energia, bem como na gestão do recurso hídrico (MENDES, 2012).

3.2 Operação de Reservatórios

A construção dos reservatórios tem como principal finalidade o armazenamento de reservas para utilização nos períodos de escassez, sendo, no Brasil, seu uso destinado, principalmente, para a geração de energia (BRAVO, 2006). Os reservatórios podem atender outros diversos usos da água, tais como o abastecimento público, irrigação, controle de cheias e navegação. Por depender das características aleatórias do processo hidrológico, a operação de reservatórios para múltiplos usos da água se torna uma tarefa complicada (BRAVO, 2010).

O volume de água armazenado no reservatório varia de mês a mês conforme a sua operação, e de acordo com as vazões afluentes ao mesmo. As decisões referentes ao planejamento da operação deste sistema determinam os intercâmbios

de energia entre as diferentes regiões do País, bem como o despacho das UTE (ZAMBON, 2015). Esta troca é de extrema importância, tendo em vista que o Brasil apresenta características climáticas muito distintas ao longo da sua extensão, apresentando regimes hidrológicos diferentes. Portanto, a energia gerada pelos reservatórios mais cheios pode ser transferida para as regiões onde os reservatórios estão mais vazios (BRAVO, 2010).

A operação dos reservatórios para geração de energia deve considerar a não linearidade entre as variáveis envolvidas no processo. As UHE dependem das vazões disponíveis para movimentar as turbinas, sendo então esta variável a responsável pelas decisões referentes a este sistema (ZAMBON, 2015). As vazões dos rios são determinadas por processos hidrológicos estocásticos no tempo e espaço. Dessa forma, a disponibilidade hídrica de um rio é uma estimativa de vazão associada a um risco de falha (ASFORA & CIRILO, 2005).

3.3 Hidrologia Estatística

A hidrologia é um ramo da ciência que estuda os fenômenos que determinam a ocorrência, circulação e distribuição da água na Terra, chamados de fenômenos hidrológicos. Por estarem associados a variações climáticas regionais e globais, bem como alterações no uso do solo, entre outras questões, a intensidade com que esses fenômenos se manifestam apresenta grande variabilidade ao longo do tempo. Estas variações temporais e/ou espaciais são representadas pelas variáveis hidrológicas, as quais podem ser quantificadas através de observações ou medições. (NAGHETTINI & PINTO, 2007). A quantificação destas variáveis deve levar em consideração que os processos hidrológicos variam ao longo do tempo e, também, do espaço (LANNA, 2013).

A variabilidade das variáveis hidrológicas é registrada em séries temporais, que são um conjunto de observações organizados cronologicamente. A série temporal pode seguir uma função determinística, quando os valores futuros da mesma podem ser determinados de forma exata, ou pode ser descrita por um modelo não determinístico. No último caso, os valores futuros da série não podem ser previstos de maneira exata, e sim por meio de leis de probabilidade, sendo estes chamados de modelos estocásticos. A análise destas séries temporais visa realizar inferências

sobre as características do processo estocástico em estudo (HIPEL & McLEOD, 1994; NAGHETTINI & PINTO, 2007).

3.3.1 Processos Estocásticos

Tendo em vista que a maioria dos processos hidrológicos são regidos por leis de probabilidade, as equações matemáticas que os descrevem são chamadas de processos estocásticos (HIPEL & McLEOD, 1994). O estudo destes processos ocupa-se de identificar e interpretar a aleatoriedade presente nos mesmos, sendo, para isto, muito utilizado os modelos matemáticos (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Estes modelos são separados em quatro tipos: Cadeias de Markov, Processos pontuais, Equações diferenciais estocásticas e Modelos de séries temporais. Essa classificação tem como base o tempo e estado que estes modelos assumem, sendo categorizados em discretos ou contínuos (HIPEL & McLEOD, 1994).

De acordo com Morettin & Toloi (2004), um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias, definidas no mesmo espaço de probabilidades, conforme Equação 1:

$$Z = \{Z(t, \omega), t \in T\}; \omega \in \Omega \quad (1)$$

Onde:

t: variável pertencente ao espaço de instantes T

ω : evento do espaço de probabilidades Ω

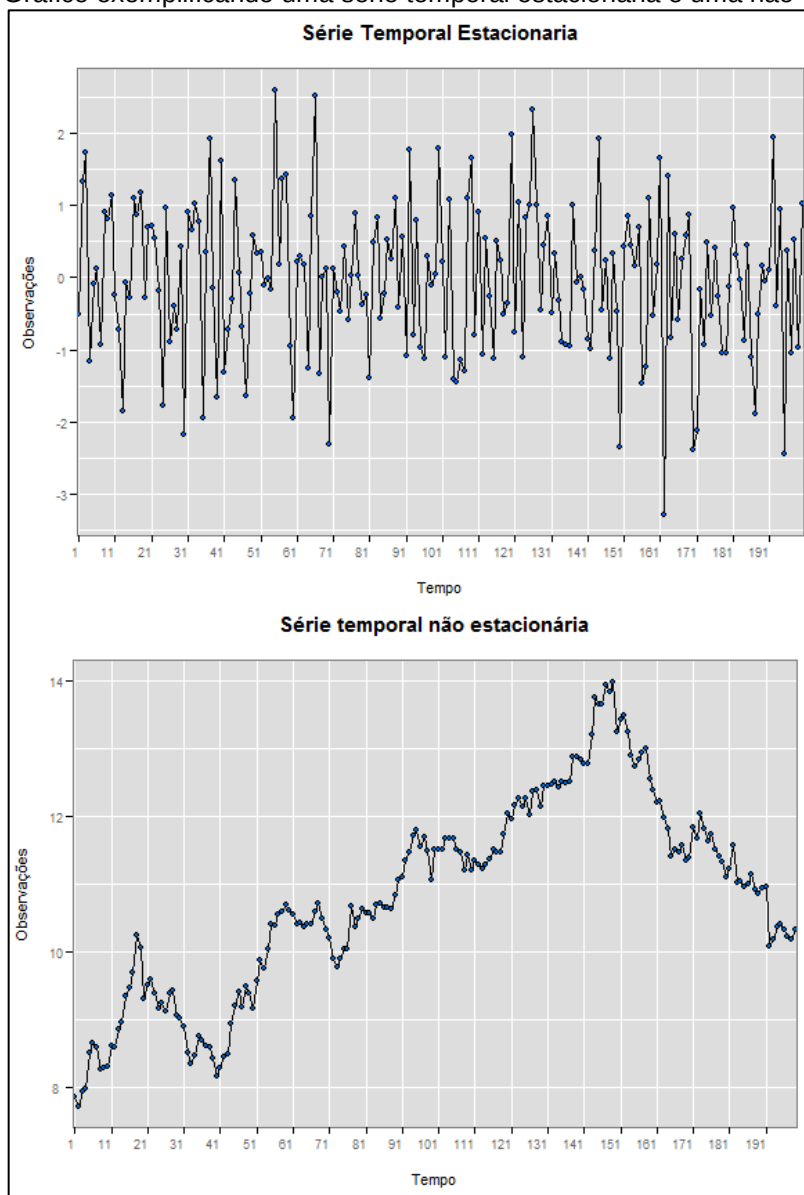
Ω : conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório

Consequentemente, um processo estocástico pode ser trabalhado como uma função de duas variáveis, na qual para cada evento ω se atribui uma variável t. Se o conjunto T é finito, se diz que é um parâmetro discreto. No entanto, se estiver dentro do conjunto dos números reais, é definido como um processo contínuo. Portanto, os processos estocásticos podem ser admitidos como uma sequência temporal de séries aleatórias (TOZZI, 2014; DETZEL, 2015). A fim de simplificar a teoria matemática por trás de um processo estocástico, usualmente se assume que o mesmo é estacionário (HIPEL & McLEOD, 1994).

3.3.2 Estacionariedade e Homogeneidade

A estacionariedade representa o estado de equilíbrio de um processo estocástico, ou seja, as suas propriedades estatísticas não variam ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 2. Um processo estocástico pode ser considerado fortemente estacionário, quando a distribuição das variáveis aleatórias do mesmo não é afetada pelo tempo. No entanto, quando os momentos estatísticos da série temporal dependem das diferenças de tempo, e não do tempo de ocorrência dos dados usados, o processo é denominado fracamente estacionário (HIPEL & MCLEOD, 1994).

Figura 2 - Gráfico exemplificando uma série temporal estacionária e uma não estacionária



Fonte: Portal Action (2018)

De acordo com Naghettini & Pinto (2007), existem três tipos de não-estacionariedade, sendo elas saltos, ciclos e tendências. A primeira diz respeito a alterações bruscas no corpo hídrico, como a construção de uma barragem. A segunda é de difícil detecção, e relaciona-se com flutuações climáticas. E por último as tendências, que estão associadas a alterações graduais que ocorrem na bacia, como por exemplo um processo de urbanização crescente (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Outra propriedade importante na estatística é a homogeneidade, a qual pressupõe que todos os elementos de uma amostra são oriundos de uma única população. O que pode diferenciar as populações de uma série hidrológica é o seu mecanismo de formação, por exemplo uma série de vazões máximas pode conter valores resultantes de precipitações comuns, como de precipitações elevadas oriundas de fenômenos como o El Niño. A heterogeneidade de uma amostra hidrológica é mais facilmente detectada quando se utilizam séries longas (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

3.3.3 Tendências em Séries Hidrológicas

A verificação da estacionariedade de séries hidrológicas pode ser realizada através da aplicação de testes de hipóteses, sendo estes, ferramentas estatísticas com o intuito de verificar suposições a respeito dos dados amostrais. É formulada uma hipótese, chamada de nula (H_0), que será testada, e uma hipótese alternativa (H_1), que será adotada como verdadeira no caso de rejeição da primeira (TRÖGER & PANTE, 2009).

Os testes podem ser divididos em paramétricos e não-paramétricos. Os paramétricos requerem a especificação da maioria dos parâmetros, sendo, portanto, aplicados em situações que se tem conhecimento sobre a distribuição que melhor representa os dados. Estes testes realizam a inferência sobre os momentos amostrais das séries (médias e variâncias), e, geralmente, se supõe que a amostra apresenta uma distribuição normal. Já os não-paramétricos não necessitam de suposições tão restritas sobre a distribuição dos dados a serem analisados, por isso são chamados, também, de testes livres de distribuição. São testes matematicamente mais simples, e mais adequados para analisar dados obtidos de populações diferentes. Os testes não-paramétricos são utilizados para identificar tendências independentemente dos momentos estatísticos das séries (FÁVERO et al., 2009; DETZEL et al., 2011).

3.3.3.1 Teste t-Student

É um teste paramétrico que visa testar a igualdade das médias populacionais de duas amostras, assumindo-se que as mesmas possuem uma distribuição normal. O teste é aplicado em duas subamostras, retiradas da amostra original. Quando as médias entre os subperíodos forem estatisticamente semelhantes, a série analisada pode ser considerada estacionária. A estatística do teste é calculada através da Equação 2 (WELCH, 1947; DETZEL et al., 2011):

$$t = \frac{X_1 - X_2}{S_{x_1 - x_2}} \quad (2)$$

Onde:

x_1 e x_2 : médias amostrais dos períodos 1 e 2, respectivamente

$s_{x_1 - x_2}$: desvio padrão do conjunto

O desvio padrão é calculado com a Equação 3:

$$s_{x_1 - x_2} = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (3)$$

Onde:

s_1^2 e s_2^2 : variâncias amostrais dos subperíodos 1 e 2

n_1 e n_2 : número de elementos dos subperíodos 1 e 2

Caso a H_0 seja verdadeira, se diz que a amostra segue uma distribuição t, com u graus de liberdade calculados através da equação de Welch-Satterthwaite, apresentada na Equação 4 (WELCH, 1947):

$$v = \frac{\left(s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2 \right)^2}{\frac{\left(s_1^2/n_1 \right)^2}{(n_1 - 1)} + \frac{\left(s_2^2/n_2 \right)^2}{(n_2 - 1)}} \quad (4)$$

Para se obter o resultado final do teste, é comparado o valor calculado através da Equação 2, com valores tabelados, para um determinado nível de significância.

3.3.3.2 Teste F-Snedecor

Teste classificado como paramétrico sobre variâncias, e, assim como o t-Student, assume que a amostra segue uma distribuição Normal. É realizado sobre duas subamostras, retiradas da amostra original, visando verificar se as variâncias das mesmas são estatisticamente semelhantes.

A estatística do teste é dada pela Equação 5 (Snedecor & Cochran, 1989 apud Detzel et al., 2011):

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (5)$$

Onde:

s_1^2 e s_2^2 : variâncias amostrais dos subperíodos 1 e 2

O resultado final do teste é obtido comparando-se o resultado da Equação 5 com a distribuição F para n_1-1 e n_2-1 graus de liberdade.

3.3.3.3 Teste do Coeficiente de Correlação de Spearman

Classificado como não-paramétrico, este teste não realiza subdivisões na amostra original. De acordo com Müller et al. (1998), é uma técnica eficiente na verificação de estacionariedade de séries hidrológicas. Primeiro são atribuídos índices à série original, em seguida a mesma é ordenada e novos índices são atribuídos. A

diferença entre os índices determina a variável chave do teste. O coeficiente de correlação de Spearman é obtido por meio da Equação 6 (SPEARMAN, 1904).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_1)^2}{N^3 - N} \quad (6)$$

Onde:

n: número de elementos da amostra

$m_t - T_1$: diferença entre os índices

A estatística do teste é calculada com a Equação 7:

$$t = r_s \sqrt{\frac{N - 2}{1 - r_s^2}} \quad (7)$$

A conclusão a respeito da H_0 é obtida através da comparação do resultado da Equação 7, com valores tabelados.

3.3.3.4 Teste de Cox-Stuart

Teste não-paramétrico que busca diferenças entre os pares formados por duas subamostras de mesmo tamanho, extraídas da amostra original. A estatística do teste é aproximada a uma distribuição Normal, para subamostras com número de elementos maior ou igual a 35, sendo calculada pela Equação 8 (Siegel & Castellan Jr, 1988 apud Detzel et al., 2011):

$$z = \frac{2x \pm 1 - n}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Onde:

x: menor valor selecionado entre os números totais de elementos positivos ou negativos

n: número de elementos

A conclusão do teste é obtida comparando-se o valor da variável calculada na Equação 8, com valores tabelados da distribuição normal padrão.

3.3.3.5 Teste de Mann-Whitney

O teste de Mann-Whitney (1947), também chamado de teste de Wilcoxon, é não-paramétrico, e divide a amostra em duas subamostras, sendo que estas não precisam conter o mesmo número de elementos. Com esta divisão, se obtém dois conjuntos, com n_1 e n_2 elementos em cada. Em seguida os valores são ordenados em conjunto e atribuídos índices. Se os elementos da primeira subamostra apresentarem valores de ordenação mais altos (ou baixos) do que os da segunda subamostra, se diz que as duas não são homogêneas. A estatística do teste V de Mann-Whitney é dada pelo menor valor entre as Equações 9 e 10 (MANN & WHITNEY, 1947; NAGHETTINI & PINTO, 2007):

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (9)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad (10)$$

Onde:

R_1 : soma das ordens de classificação dos elementos da primeira subamostra

N_1 : nº de elementos da primeira subamostra

N_2 : nº de elementos da segunda subamostra

Partindo da hipótese de que a amostra é homogênea e, $N_1, N_2 > 20$, V segue uma distribuição Normal, e a média e variância são obtidas através das Equações 11 e 12, respectivamente (NAGHETTINI & PINTO, 2007):

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad (11)$$

$$\text{Var}[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (12)$$

A estatística do teste é dada pela Equação 13, a qual segue uma distribuição Normal. Por ser um teste bilateral, a decisão deve ser de rejeitar, ou não, a hipótese nula de que a amostra é homogênea, se $|T| > Z_{1-\alpha/2}$.

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{\text{Var}[V]}} \quad (13)$$

3.3.3.6 Teste de Mann-Kendall

Também classificado como não-paramétrico, o teste de Mann-Kendall utiliza a série completa, sem divisões. É aplicado para verificar se a série de dados apresenta uma tendência temporal estatisticamente significativa. Este método consiste na rejeição, ou não, da H_0 , adotando-se um nível de significância (α). Se parte do princípio que ao sortear aleatoriamente qualquer elemento da série, o mesmo é oriundo de uma única população (WAGESHO et al., 2012; SALVIANO et al., 2015). A variável estatística S é calculada conforme a Equação 14 e 15:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (14)$$

Onde:

sgn: sinais

x_j : valores futuros da série

x_i : valores da série

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & \text{se } x_j > x_i \\ 0; & \text{se } x_j = x_i \\ -1; & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (15)$$

Quando $n \geq 10$, S pode ser comparada com uma distribuição normal, sendo a sua variância obtida pela Equação 16:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (16)$$

Onde:

t_i : quantidade de repetições de uma extensão i

Conforme o sinal de S , calculado pela Equação 15, se calcula o índice Z_{MK} . Este índice segue a distribuição normal, sendo que valores positivos indicam tendência crescente, e valores negativos tendências decrescentes (WAGESHO et al., 2012; SALVIANO et al., 2015). O índice Z_{MK} da distribuição normal é calculado através da Equação 17:

$$\begin{aligned} Z_{MK} &= \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} ; \text{ para } S > 0 \\ Z_{MK} &= 0 ; \text{ para } S = 0 \\ Z_{MK} &= \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} ; \text{ para } S < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Trata-se de um teste bi-caudal, portanto, para rejeitar H_0 é necessário que o valor absoluto de Z_{MK} seja superior a $Z_{\alpha/2}$.

3.3.3.7 Teste de Pettitt

Teste não paramétrico que faz uso da estatística de Mann-Whitney, a qual verifica se duas amostras são da mesma população (PETTITT, 1979). A estatística do teste é calculada conforme Equações 18 e 19.

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \text{ para } t = 2, 3, \dots, N \quad (18)$$

$$\text{sgn} = (x) \begin{cases} 1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (19)$$

A hipótese nula do teste assume que não existe um ponto de mudança na série. O ponto de mudança t significativo é representado pela estatística $k(t)$, sendo, neste ponto, o valor de $|U_{t,N}|$ máximo, conforme apresentado na Equação 20.

$$k_{(t)} = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (20)$$

O nível de significância do teste é calculado de acordo com a Equação 21.

$$P = 2e^{\left\{ \frac{-6 (K_N)^2}{(N^3 + N^2)} \right\}} \quad (21)$$

Onde:

P: nível de significância

K_N : valor crítico

N: nº de anos da série histórica

3.3.4 Análise Exploratória dos Dados

A análise exploratória de dados, tradução do termo inglês *exploratory data analysis* (EDA), refere-se a um conjunto de técnicas visuais de análise dos dados, não se preocupando em elaborar premissas sobre os mesmos (KUNDZEWICZ & ROBSON, 2004; NAGHETTINI & PINTO, 2007). Kundzewicz e Robson (2000), salientam a importância deste tipo de análise em estudos que visam identificar mudanças de tendências em registros hidrológicos. Utilizada para identificar outliers, padrões temporais e, também, na verificação de hipóteses de teste (independência ou distribuição estatística dos dados) (KUNDZEWICZ & ROSBON, 2004).

Para a exploração de tendências em séries hidrológicas são comumente utilizadas a plotagem de histogramas relacionados com o gráfico de probabilidade normal, gráficos temporais e de correlação, e as curvas “suavizadoras” (KUNDZEWICZ & ROSBON, 2004).

Entre as funções suavizadoras as mais simples e utilizadas são as que inserem a média e mediana móveis e a regressão de LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*). Na primeira técnica, se utiliza a média e/ou mediana da variável sobre períodos iniciando em tempos sucessivos, acarretando na suavização dos dados e consequente facilitação na visualização de eventuais tendências (GRAYSON et al., 1996 apud TOZZI, 2014). Na segunda, a série é suavizada através do ajuste sucessivo de retas de mínimos quadrados (CLEVELAND, 1979).

Outra técnica de análise preliminar é a *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS), onde as elevações ou depressões mais acentuadas podem ser indícios de tendência na série hidrológica. A declividade negativa indica um período com média menor do que a anterior ao ponto de mudança, enquanto a declividade positiva indica médias maiores (ALEMAW & CHAOKA, 2002).

Fill (2011) utiliza o gráfico das vazões acumuladas contra o tempo a fim de verificar visualmente locais de mudança na declividade, sendo então definidos grupos anteriores e posteriores a mudança da declividade. De acordo com Tozzi (2014), a análise exploratória dos dados permite estimar possíveis períodos de mudança nas séries, bem como verificar a suspeita de variações contínuas ou periódicas.

3.3.5 Estudos Anteriores

Devido as eventuais alterações nas características estatísticas das séries hidrológicas ao longo do tempo, diversos estudos foram realizados com intuito de verificar a condição de não estacionariedade de séries históricas. No Quadro 1 estão apresentados os principais estudos realizados nos últimos anos.

Quadro 1 - Estudos anteriores realizados na verificação de estacionariedade de séries hidrológicas (continua)

Autores	Estudo	Conclusão
Genta et al. (1997)	Estudaram séries de vazões dos quatro maiores rios da América do Sul. Testes aplicado: Wilcoxon.	Verificaram um aumento linear das vazões em todos os casos, e uma diferença significativa entre as medianas das séries nos períodos antes e após 1970.
Moraes et al. (1997)	Realizaram a análise exploratória e a modelagem estocástica de séries anuais de vazões dos três rios principais da bacia do Piracicaba. Testes aplicados: Pettitt e Mann-Kendall.	Redução das afluências.
Freitas (1997)	Realizaram a análise estatística em três séries de rios no Estado do Ceará. Testes aplicados: teste t e teste de Anderson.	Sem evidências estatísticas de não estacionariedade.
Marengo et al. (1998)	Verificaram a estacionariedade de afluências para regiões Nordeste e Amazônicas do Brasil, e noroeste do Peru. Teste aplicado: Mann-Kendall.	Detectaram tendências negativas no rio São Francisco, positivas na bacia do rio Parnaíba e nenhuma tendência significativa na Amazônia.

(continuação)

Müller et al. (1998)	Analisaram séries na bacia incremental da usina de Itaipu. Testes aplicados: Wald-Wolfowitz, Cox-Stuart, Coeficiente de Correlação de Spearman, Mann-Kendall, Wilcoxon, Kruskal-Wallis, t-Student e de Tendência Polinomial.	Vazões aumentaram significativamente após 1970.
Silva e Alencar (2001)	Analisaram a estacionariedade de séries de vazões na bacia do Rio Gramame. Testes aplicados: Wilcoxon e Mann & Whitney.	Decréscimo nas afluições.
Guetter e Prates (2002)	Analisaram 54 estações fluviométricas componentes do SIN. Testes aplicados: t-Student e F.	Aumento das vazões nas bacias dos rios Iguaçu, Paraná, Paranaparema, Tietê, Paranaíba e Tocantins a partir da década de 70.
Sáfadi (2004)	Verificou a existência de tendência nas séries da usina de Furnas. Teste aplicado: Cox-Stuart.	Aumento das vazões.
Marengo e Alves (2005)	Analisaram a tendência negativa nas séries históricas de vazões do Rio Paraíba do Sul desde 1920. Testea aplicado: Mann-Kendall	Decréscimo nas afluições.
Batista et al. (2009)	Verificaram a não estacionariedade de nove usinas, situadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Testes aplicados: t-Student e Wilcoxon.	Séries hidrológicas do Sul podem ser caracterizadas como não estacionárias.
Pedrosa e Souza (2009)	Verificaram a estacionariedade de séries no Estado de Alagoas. Teste aplicado: t-Student.	Sem evidências estatísticas de não estacionariedade.

(conclusão)

Detzel et al. (2011)	Verificaram a estacionariedade de 146 séries de afluições referentes a usinas hidrelétricas do SIN até o ano de 2007. Testes aplicados: t-Student, Cox-Stuart, Wilcoxon, Coeficiente de Correlação de Spearman, Mann-Kendall e F-Snedecor.	Confirmaram a condição de não estacionariedade de 75 das 146 séries testadas.
Salviano et al. (2016)	Analisaram as tendências temporais da precipitação e temperatura média no Brasil. Teste aplicado: Contextual Mann-Kendall.	Tendências não significativas em mais de 70% do território para variável precipitação. A temperatura apresentou tendência positiva significativa em grande parte do Brasil.
Bartiko et al. (2017)	Avaliar a presença da condição de não estacionariedade em séries de vazões máximas anuais no sul do Brasil. Teste: modelo de análise de frequência não estacionária desenvolvido por Vogel, Yandi e Walter (2011).	75 de 157 séries do sul do Brasil podem ser consideradas não-estacionárias. Identificaram mudanças abruptas na década de 70.

Fonte: Autor (2018)

3.4 Alteração no Uso do Solo

De acordo com Tucci & Clarke (1997), o comportamento hidrológico de uma bacia é afetado pelas alterações na cobertura vegetal da mesma, sejam elas antrópicas ou naturais. A mudança da vegetação altera a resposta de escoamento da bacia, pois o equilíbrio entre precipitação e evaporação é alterado (COSTA et al., 2003).

A geração de escoamento e a consequente divisão em superficial, sub-superficial e subterrâneo são influenciados pelo tipo de solo presente na bacia, bem como a sua cobertura. Regiões que apresentam florestas, por exemplo, possuem uma

capacidade de infiltração e interceptação elevadas, o que acarreta em uma redução do escoamento superficial. Já solos descobertos sofrem compactação e sua capacidade de infiltração pode ser reduzida (TUCCI & CLARKE, 1997).

Uma das consequências do desenvolvimento e aumento do processo de urbanização é o uso e ocupação do solo de maneira desordenada, acarretando em diversos impactos sobre as bacias hidrográficas. As modificações realizadas pelo homem levaram a alterações em componentes do ciclo hidrológico local, destacando-se a capacidade de infiltração do solo e a geração do escoamento superficial (SOUZA et al., 2017).

A mudança da cobertura do solo e a variação climática são as principais responsáveis pelas alterações hidrológicas nas bacias, podendo afetar significativamente o fluxo da água, modificando seu padrão, magnitude, frequência e qualidade (BETHLAHMY, 1974; CHENG, 1989; MOORE & WONDZELL, 2005; CUI et al., 2012). Os impactos oriundos das alterações da superfície da bacia são, na maioria das vezes, caracterizados em relação ao seu efeito no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média (TUCCI & CLARKE, 1997). De acordo com Santos et al. (2016), as mudanças na cobertura vegetal de uma bacia podem acarretar na não estacionariedade de séries de vazões.

Diversos estudos foram realizados em diferentes locais do mundo a fim de verificar a influência da cobertura vegetal no comportamento hidrológico de uma bacia. Autores como Bosch & Hewlett (1982), Cui & Wei (2012), Zhao et al. (2012) afirmam que a remoção da vegetação acarreta em aumento da vazão média de longo termo. Além disso, alguns autores, tais como Hsia & Koh (1983), Adnan & Atkinson (2010) e He et al. (2013), relacionaram a não estacionariedade em séries históricas de vazões com a modificação no uso solo.

No Brasil, Costa et al. (2003), em estudo realizado na Bacia do Alto Tocantins, concluíram que o aumento nas vazões, durante o período chuvoso foi consequência da redução da infiltração, ocasionada pela alteração do uso e cobertura do solo. COE et al. (2011), relacionaram o aumento das vazões em uma bacia hidrográfica do Rio Araguaia, no centro-leste do Brasil com o desflorestamento em conjunto com a variabilidade climática. Santos et al. (2016), em estudo realizado na bacia do Rio Pardo, também atribuíram o aumento das vazões a substituição da vegetação natural por pastagens.

3.5 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório

Os reservatórios oferecem uma série de benefícios, devido aos diferentes usos da água que podem atender. Visando a maximização destes benefícios se torna importante a otimização da operação dos mesmos, melhorando, assim, a eficiência do sistema (MELO, 2010). De acordo com Labadie (2004), a administração de sistemas de reservatórios por meio da simulação, utilizando modelos computacionais, vem sendo aplicada por várias décadas. A simulação consiste em um processo iterativo, que faz uso de equações matemáticas, com intuito de reproduzir o comportamento de um determinado sistema no computador (YEH, 1985). A otimização é uma abordagem muito semelhante à simulação, no entanto estes modelos buscam uma solução ótima, enquanto os de simulação são limitados a prever o comportamento do sistema (WURBS, 1993).

O uso de modelos apresenta, como vantagem, uma representação mais detalhada do sistema, permitindo uma avaliação mais precisa sobre o seu comportamento. Portanto, é uma técnica que auxilia na gestão do recurso hídrico bem como na tomada de decisões referente a operação do reservatório (MELO, 2010).

Os métodos de otimização são classificados em: programação linear (LP), programação dinâmica (DP), programação não-linear (PNL) e simulação. A LP consiste em uma das técnicas mais utilizadas na gestão de recursos hídricos, resolvendo problemas em que as relações entre as variáveis são lineares. Já a DP trabalha com características não-lineares e estocásticas, sendo um método que visa otimizar o processo de decisão em múltiplos estágios. A PNL consiste em um processo de otimização mais lento e que requer grande espaço de armazenamento, sendo, portanto, menos popular. A simulação, como citado anteriormente, é utilizada para reproduzir o comportamento de um sistema no computador (YEH, 1985).

O modelo MODSIM, desenvolvido por Shafer em 1979, é um modelo de rede de fluxo, incorporado a um sistema de apoio à decisão (LABADIE et al., 1986; MELO, 2010). Por se tratar de um modelo de rede de fluxo, combina, de maneira eficiente, a simulação e otimização por LP, garantindo que os objetivos, prioridades e limitações operacionais sejam satisfeitas. O MODSIM é utilizado para auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos, bem como no planejamento e análise do impacto de projetos de aproveitamento destes recursos (AZEVEDO et al., 1997).

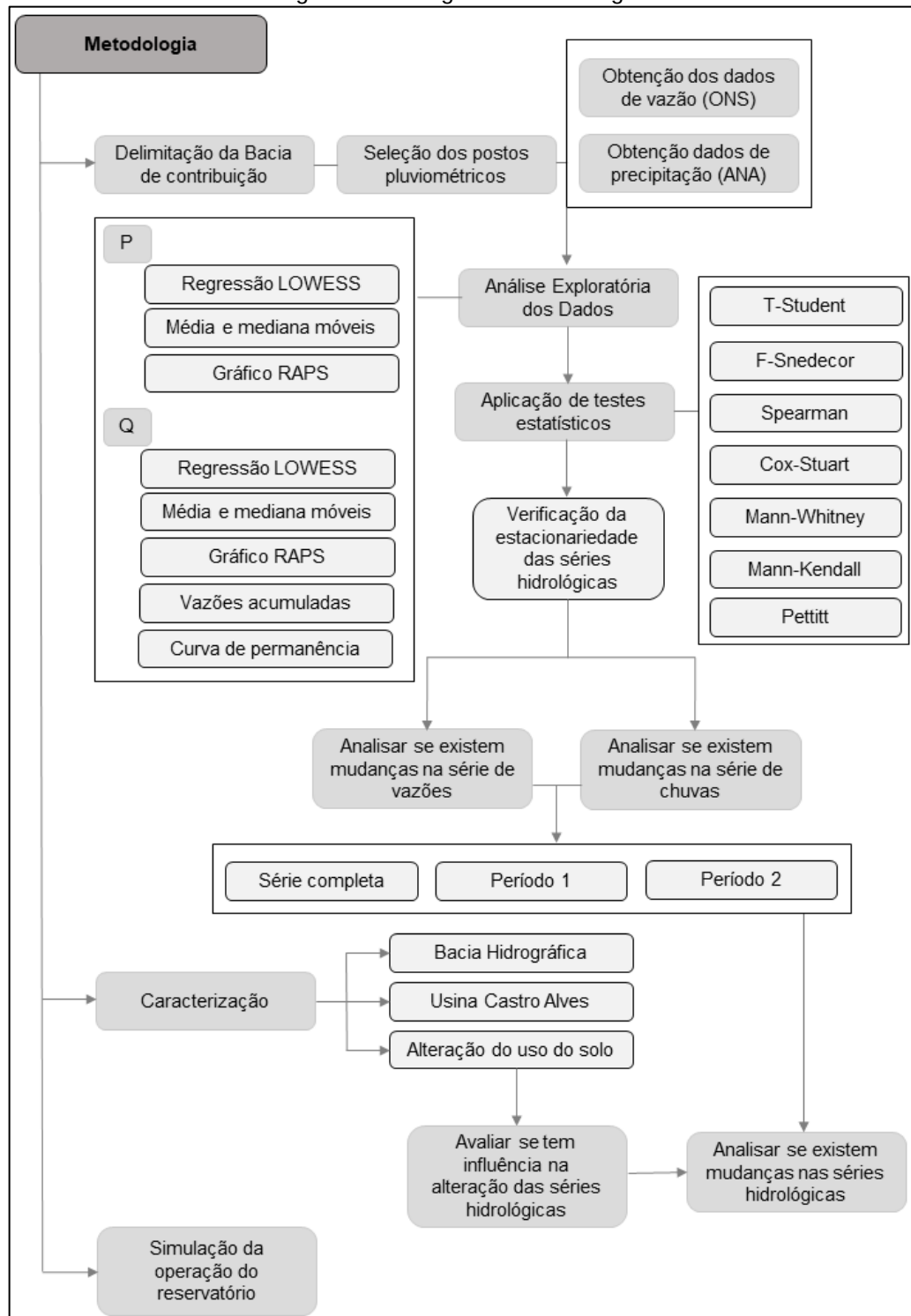
O AcquaNet, criado a partir do MODSIM, é um modelo desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisão (LabSid), da Escola Politécnica da USP. Consiste em um modelo de rede de fluxo para bacias hidrográficas, através do qual o usuário pode representar o problema estudado de forma bastante detalhada, montando redes com um grande número de reservatórios, trechos de canais e demandas (LABSID, 2013).

O modelo oferece duas opções de simulação, sendo elas a Simulação Contínua e o Planejamento Tático. Na primeira os cálculos são efetuados de maneira sequencial ao longo do tempo, sendo recomendada quando o usuário deseja verificar o comportamento do sistema ao longo do tempo. Já na segunda opção de simulação, os cálculos são executados estatisticamente, e, recomenda-se a sua utilização quando o objetivo é realizar o planejamento e/ou operação de sistema de reservatórios (LABSID, 2013).

4 Materiais e Métodos

Nos itens seguintes serão descritas as metodologias utilizadas para realização do presente trabalho, esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma metodológico

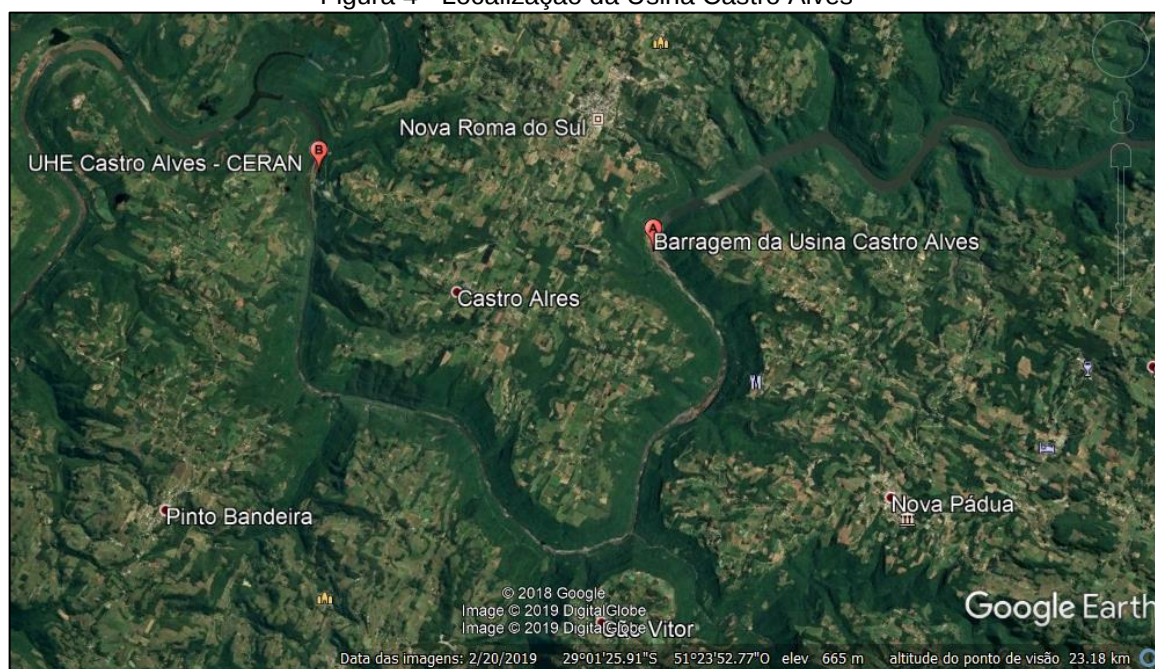


Fonte: Autor (2019)

4.1 Área de Estudo

Localizada no Estado do Rio Grande do Sul, a UHE Castro Alves é composta por três unidades geradoras, as quais iniciaram sua operação em março, abril e junho de 2008. Os geradores são do tipo síncrono de eixo vertical, e possuem potência unitária nominal de 48,58 MVA. As turbinas são do tipo Francis e contam com uma potência unitária nominal de 44,58 MW. A barragem possui uma altura máxima de 45 m, e é do tipo Gravidade, em Concreto Compactado a Rolo (CCR). O reservatório da usina conta com uma área alagada de 5 km² e profundidade máxima de 45 m (CERAN, 2018). Na Figura 4 está apresentada a localização da UHE e da sua barragem.

Figura 4 - Localização da Usina Castro Alves



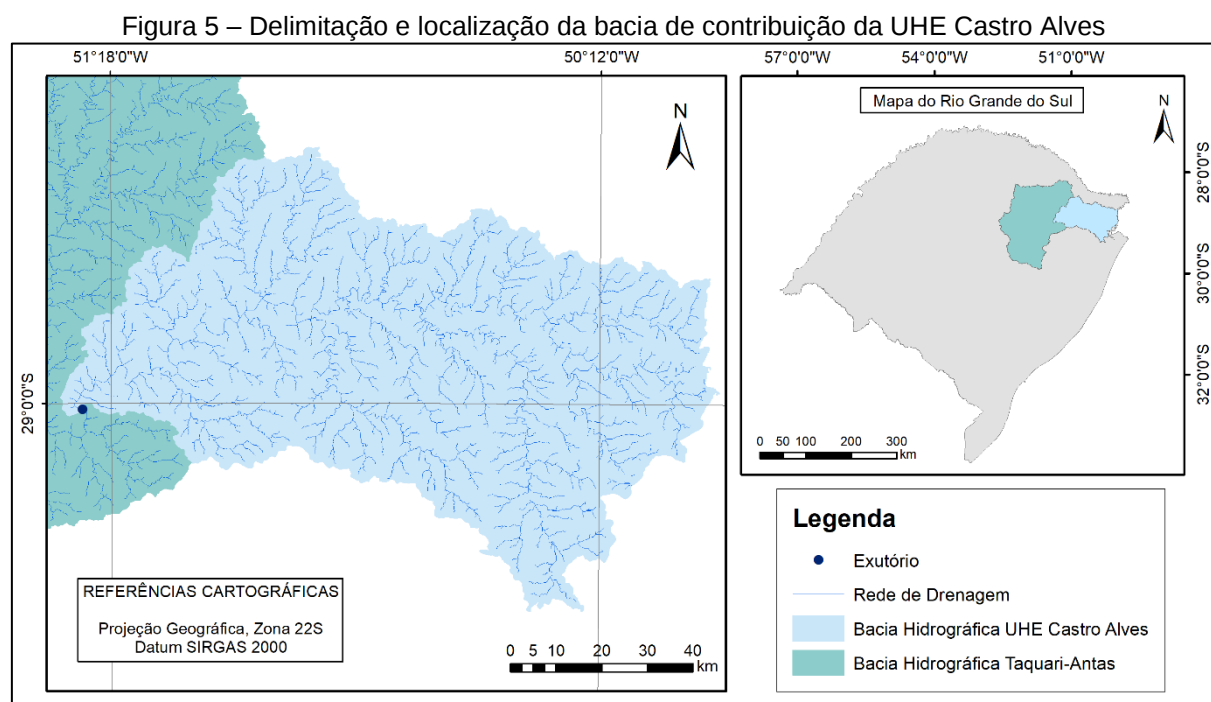
Fonte: Google Earth (2019)

A UHE Castro Alves encontra-se instalada no Rio das Antas, um dos principais cursos d'água da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, a qual localiza-se a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, e possui uma área de 26.491,82 km². Abrangendo parte dos Campos de Cima da Serra e região do Vale do Taquari, onde há predomínio da agropecuária e intensa atividade industrial. De acordo com o Plano da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (STE, 2012), os principais usos do solo na bacia são a agropecuária (32,58%), vegetação arbórea (33,54%) e campos ou pastagens (16,49%). Quanto aos usos consuntivos e não consuntivos da água, podem ser

citados abastecimento público, agricultura irrigada e pecuária, abastecimento para indústria, geração de energia e recursos minerais.

4.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica

A delimitação da bacia de contribuição da Usina Castro Alves foi obtida com auxílio do *Software* ArcGIS 10.5, e está apresentada na Figura 5. A sua caracterização foi realizada através da obtenção dos dados fisiográficos da mesma. Para o presente trabalho foram utilizados os seguintes indicadores: área e perímetro da bacia, comprimento do rio principal, tempo de concentração, declividade média da bacia e características do uso do solo.



Fonte: Autor com base em IBGE Geociências e Weber et al. (2018)

A área da bacia (A) consiste em uma das suas características mais importantes, pois reflete o volume total de água que pode ser potencialmente gerado na mesma. O perímetro (P) refere-se ao comprimento total da linha do divisor de águas que circunda, e limita, a bacia hidrográfica. Estes índices, bem como a declividade média da bacia (S), foram obtidos a partir de ferramentas disponibilizadas no *Software* ArcGIS 10.5 e Idrisi Selva.

O tempo de concentração (T_c), refere-se ao tempo necessário para que a água precipitada escoe do ponto mais distante até o exutório. O T_c foi calculado através do método de Kirpich (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013), conforme a Equação 18.

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (18)$$

Onde:

T_c : tempo de concentração (min)

L : comprimento do talvegue (km)

Δh : diferença de altitude ao longo do talvegue (m)

4.3 Caracterização do Regime de Chuvas

Para realização da caracterização do regime de chuvas da bacia de contribuição da Usina Castro Alves, foram utilizados dados do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA).

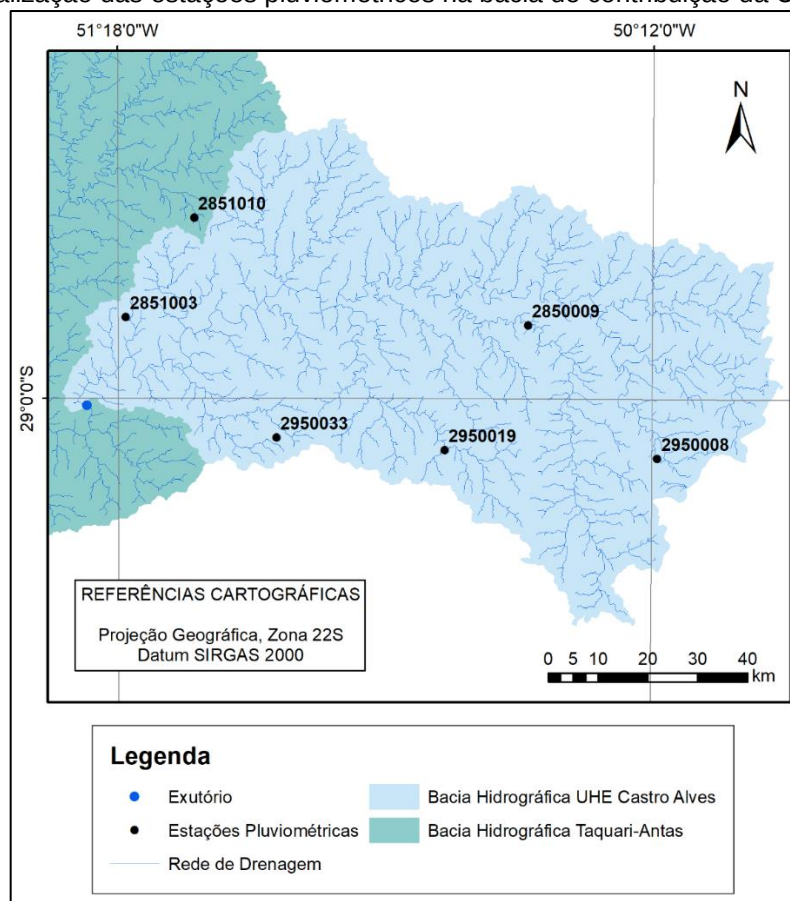
Para o presente estudo foram selecionadas seis estações pluviométricas, localizadas dentro, ou próximo, da bacia de contribuição da UHE Castro Alves. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais informações das estações utilizadas, e na Figura 6 está apresentado o mapa com a localização dos postos na bacia de contribuição. Como critério para selecionar os postos, verificou-se os que apresentavam maior disponibilidade de dados e menor quantidade de falhas. A disponibilidade temporal das estações foi verificada com auxílio do *Software* Super Manejo de Dados, cujo gráfico gerado pode ser visualizado na Figura 7.

Tabela 1 - Informações das estações pluviométricas utilizadas

Estação	Código	Latitude	Longitude	Município	Altitude (m)	Disponibilidade de Dados	
						Início	Fim
Seca	2950033	-29.0719	-50.9739	Caxias do Sul, RS	880	1945	2017
Lajeado Grande	2950019	-29.0942	-50.6275	São Francisco de Paula, RS	900	1944	2017
Camisas	2950008	-29.1083	-50.1875	Cambará do Sul, RS	920	1946	2017
Fazenda Roseira	2851010	-28.6733	-51.1428	Campestre da Serra, RS	800	1963	2017
Antônio Prado	2851003	-28.8533	-51.2844	Antônio Prado, RS	630	1945	2017
Passo Tainhas	2850009	-28.8675	-50.4561	Jaquirana, RS	640	1945	2017

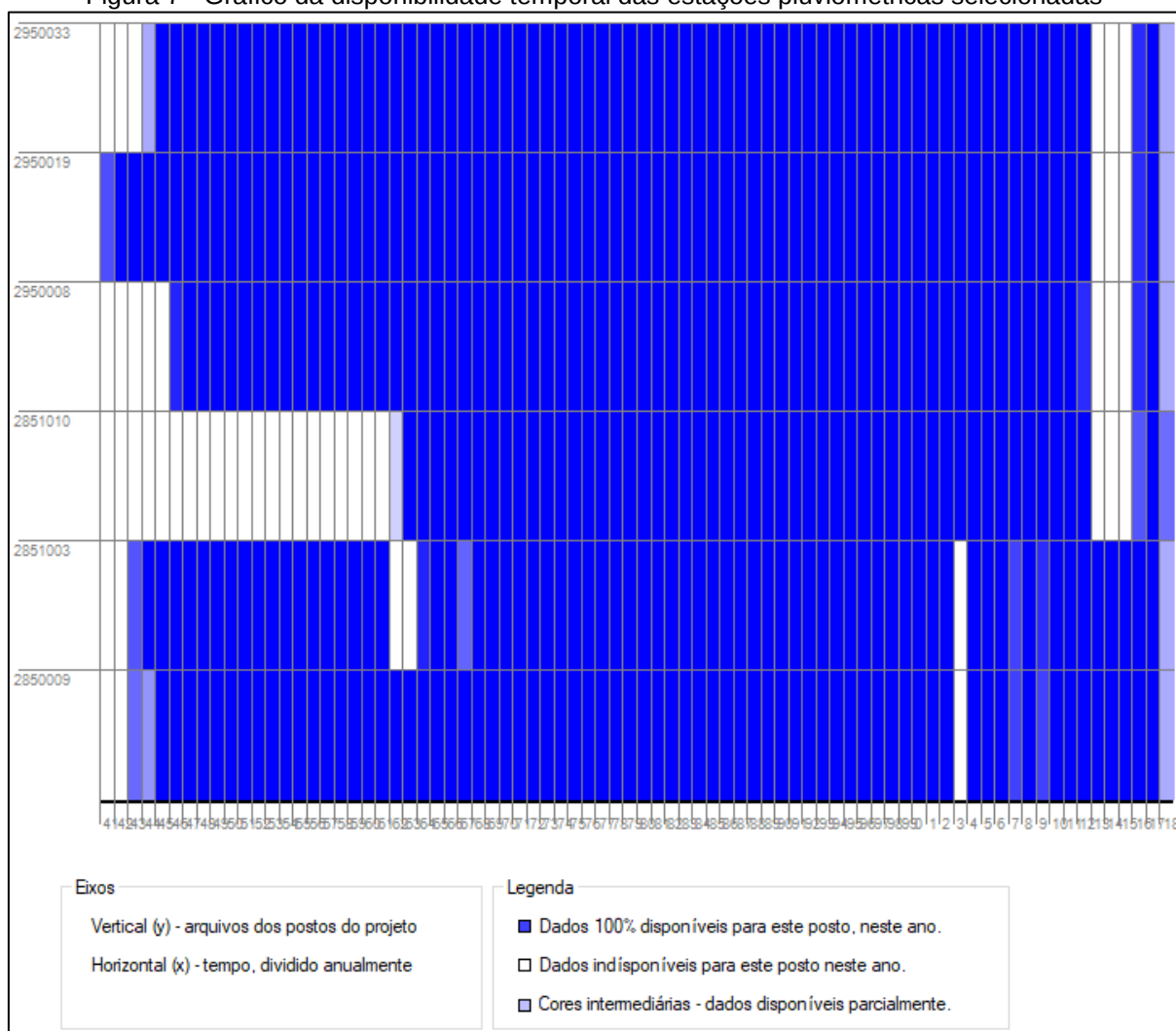
Fonte: Adaptado de Hidroweb (2018)

Figura 6 – Localização das estações pluviométricas na bacia de contribuição da UHE Castro Alves



Fonte: Autor com base em IBGE Geociências, Weber et al. e Hidroweb (2018)

Figura 7 - Gráfico da disponibilidade temporal das estações pluviométricas selecionadas



Fonte: Super Manejo de Dados (2018)

Para o preenchimento das falhas foi utilizado o Método da Ponderação Regional (BERTONI & TUCCI, 2013), conforme Equação 19:

$$PY = \frac{1}{n} \left[\frac{PX1}{Xm1} + \frac{PX2}{Xm2} \right] Ym$$

(19)

Onde:

PY: precipitação estimada em Y no intervalo que apresenta falha

Ym: precipitação média do posto Y

Xm1 e Xm2: médias dos postos X

PX1 e PX2: precipitações dos postos X1 e X2 no intervalo de tempo em que Y apresenta falha

n: número de postos

A precipitação média da bacia foi calculada através do Método de Thiessen (BERTONI & TUCCI, 2013), conforme Equação 20, e com auxílio do *Software* ArcGIS 10.5 foram geradas as áreas de influência de cada posto.

$$P_m = \frac{1}{A} \sum A_i P_i$$

(20)

Onde:

P_m : precipitação média da bacia (mm)

A : área total da bacia (km²)

A_i : área de influência do posto i

P_i : precipitação registrada no posto i

Foram calculados os seguintes elementos: precipitação média mensal, precipitação total anual, precipitações máximas e mínimas mensais e precipitações trimestrais máximas, médias e mínimas.

4.4 Vazões Naturais Afluentes

As séries de vazões naturais afluentes à UHE Castro Alves foram obtidas através do ONS. Os dados de vazões mensais utilizados no presente estudo são referentes ao período de 1945 a 2017. Os mesmos foram organizados em uma planilha do Excel para posterior análise estatística.

4.5 Análise Exploratória dos Dados

Para a análise visual dos dados foram utilizadas três técnicas, sendo elas: funções suavizadoras com inserção da média e mediana móveis, regressão de LOWESS e construção do gráfico RAPS. As análises foram realizadas nas séries de precipitações totais anuais, obtidas a partir da média encontrada pelo método de Thiessen, e vazões médias anuais, referentes ao período de 1945 a 2017.

Para a série de vazões também foi utilizado o gráfico das vazões acumuladas e as curvas de permanências, com intuito de verificar variações nas vazões máximas e mínimas dos períodos analisados.

4.6 Aplicação dos Testes Estatísticos

Para a verificação da estacionariedade e homogeneidade das séries hidrológicas foram utilizados sete testes estatísticos: t-Student, F-Snedecor, Coeficiente de Correlação de Spearman, Cox-Stuart, Mann-Whitney, Mann-Kendall e Pettitt. As equações de cada um dos testes estão apresentadas no capítulo 3, referente ao referencial teórico. Os testes foram aplicados considerando um nível de significância de 5%.

Para verificação da estacionariedade e homogeneidade foram utilizadas a série de vazões médias mensais e a série de precipitações totais anuais. As análises foram realizadas em três períodos diferentes, conforme apresentado na Tabela 2. Estudos como Genta et al. (1998), Müller et al. (1998), Guetter & Prates (2002) e Batista et al. (2009) notaram uma diferença significativa nas afluições após a década de 1970. Nesse contexto, para os testes que dependem da divisão da amostra, bem como para a seleção das quebras das séries completas, o ano limite para essa separação foi definido em 1969. A escolha dessa data também foi corroborada a partir dos resultados obtidos através da análise de Pettitt, a qual é apresentada no item 5.4.

Tabela 2 – Períodos que foram realizadas as análises

	Períodos de análise
Período 1	1945 – 2017
Período 2	1945 – 1969
Período 3	1970 - 2017

Fonte: Autor (2018)

4.7 Alteração do Uso do Solo e Dados Diários

A avaliação da alteração do uso do solo, na bacia de contribuição da UHE Castro Alves, foi realizada com os dados disponibilizados pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura do Solo do Brasil (MapBiomas, 2018), com auxílio do *Software* ArcGIS 10.5. Os mapas de cobertura e uso do solo do MapBiomas são

gerados a partir de classificação pixel a pixel de imagens do satélite Landsat, sendo apresentados no formato matricial (pixel de 30x30 m). Para o presente trabalho foram utilizados os mapas referentes ao bioma Mata Atlântica, onde está inserida a área de estudo.

Nesta etapa foi analisada, também, a série de vazões diárias, com intuito de verificar se há diferença entre as máximas e mínimas ao longo dos anos. As vazões diárias foram obtidas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas (ANA). Em decorrência da disponibilidade de dados, foi analisado apenas o período de 1993 a 2016. Tendo em vista a disponibilidade de dados diários de vazão, a análise da alteração do uso do solo foi realizada para os anos de 1993, 2003, 2013, 2016 e 2017.

4.8 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório

A simulação da operação do reservatório da UHE Castro Alves foi realizada com auxílio do *Software* AcquaNet 2013. Para a simulação foram considerados três cenários de afluência, sendo eles: a série completa de vazões naturais (1945 a 2017), período 2 (1945 a 1969) e período 3 (1970 a 2017). Os dados referentes aos volumes e nível máximo e mínimo do reservatório, à evaporação mensal e às curvas cota-área-volume foram obtidos junto ao CERAN.

A simulação foi realizada considerando duas demandas, sendo uma referente à vazão mínima estabelecida pelo órgão ambiental estadual (FEPAM) e outra a vazão mínima de operação da UHE, conforme apresentado na Tabela 3. Para a simulação considerou-se como vazão mínima de operação 50% da vazão máxima turbinada (155,95 m³/s). Na Figura 8 está apresentada a rede de fluxo montada para o presente estudo.

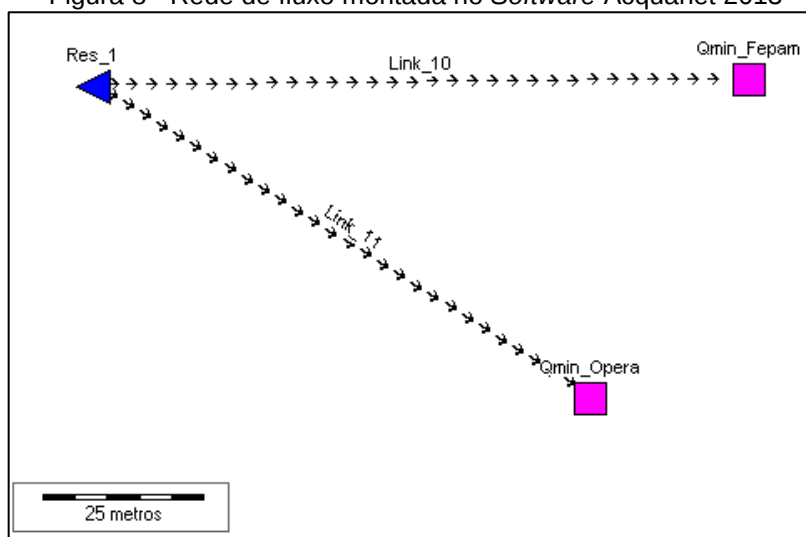
Tabela 3 - Simulações realizadas e respectivas demandas

Cenários	Série de Vazões	Nº de Demandas	Demandas
Simulação 1 (1945 – 2017)	Não-estacionária	2	17 m ³ /s ¹ 77,98 m ³ /s ²
Simulação 2 (1945 – 1969)	Não-estacionária		
Simulação 3 (1970 – 2017)	Estacionária		

Fonte: Autor (2019)

¹Vazão mínima (FEPAM)

²Vazão mínima de operação da UHE

Figura 8 - Rede de fluxo montada no *Software* Acquanet 2013

Fonte: Autor (2019)

Nas definições gerais do *Software* Acquanet optou-se pela simulação Contínua e a opção de cálculo escolhida foi a de Calibração. O intervalo de cálculo utilizado foi o mensal, e a duração do mesmo é referente ao período da série analisada, totalizando 73 anos. Na Tabela 4 estão apresentados os elementos utilizados na simulação, com seus respectivos valores de prioridade de atendimento.

Tabela 4 - Elementos utilizados na simulação

Elemento	Prioridade
Reservatório UHE	99
Vazão mínima - FEPAM	1
Vazão mínima de operação	2

Fonte: Autor (2019)

O desempenho do reservatório foi avaliado conforme metodologia proposta por Hashimoto et al. (1982), através do cálculo dos índices de confiabilidade (α), resiliência (γ) e vulnerabilidade (v). A confiabilidade de um sistema é descrita como a probabilidade de o mesmo não apresentar falhas dentro de um período de tempo fixo, calculado pela Equação 21.

$$\alpha = Prob [X_t \in S] \quad (21)$$

Onde:

X_t : conjunto de dados

S: sistema satisfatório

A resiliência do sistema é o quão rápido o mesmo consegue se recuperar de uma falha, uma vez que esta tenha ocorrido. É a probabilidade de, após um valor insatisfatório no tempo t, o sistema se recuperar para um estado satisfatório no tempo t+1, calculado através da Equação 22:

$$\gamma = Prob \{X_{t-1} \in S \mid X_t \in F\} \quad (22)$$

Onde:

X_t : variável de estado do sistema considerado no momento t

X_{t-1} : variável de estado do sistema considerado no momento t-1

S: sistema satisfatório

F: sistema insatisfatório

A vulnerabilidade representa a magnitude da falha, se a mesma ocorrer, calculada com a Equação 23:

$$v = \frac{\sum_{j=1}^{f_s} \max(s_j)}{f_s} \quad (23)$$

Onde:

S_j : déficit volumétrico

f_s : número de sequências de falhas contínuas

5 Resultados e Discussão

Nos itens seguintes são apresentados os resultados obtidos com a metodologia aplicada.

5.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros fisiográficos obtidos para a bacia de contribuição da UHE Castro Alves.

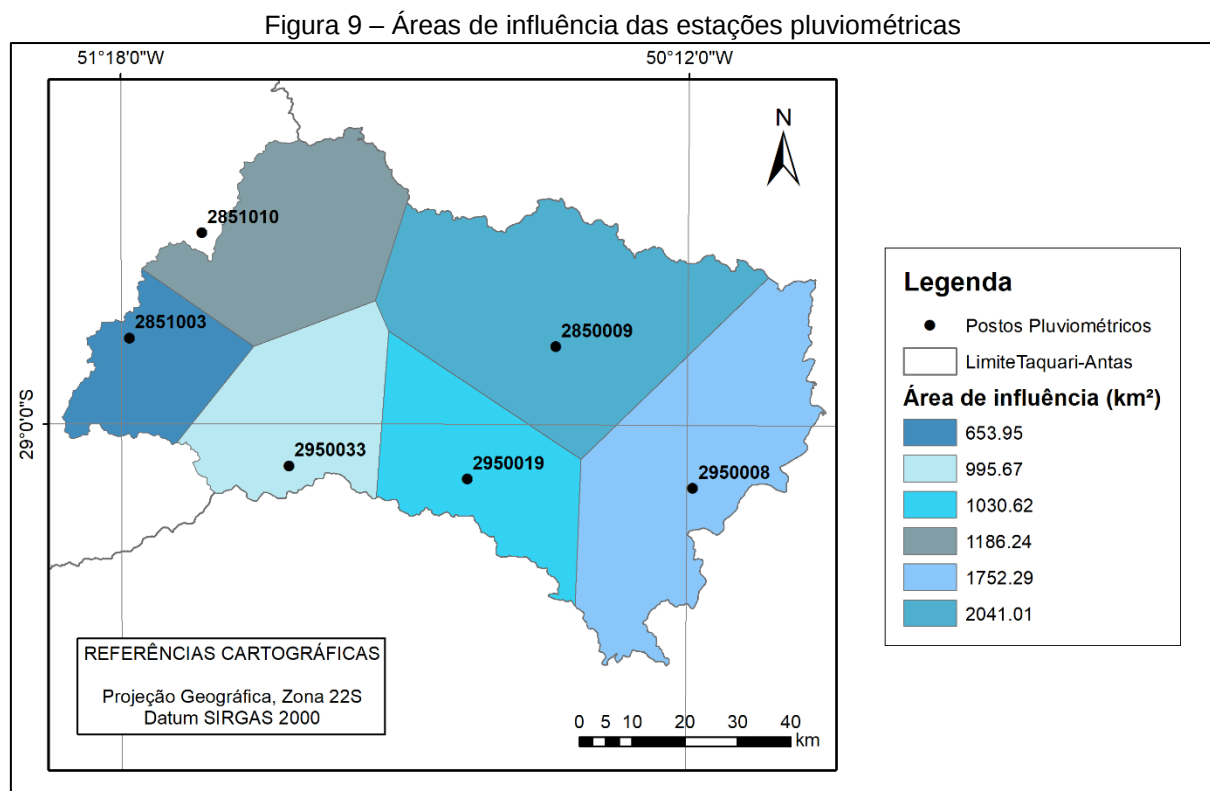
Tabela 5 - Indicadores fisiográficos obtidos para a bacia de contribuição da UHE Castro Alves

Indicadores Fisiográficos	Símbolo	Valor
Área de Drenagem (km²)	A	7659,92
Perímetro da Bacia (km)	P	697,68
Comprimento do Rio Principal (km)	L	292,18
Declividade Média	%	15,12
Tempo de Concentração (min)	Tc	3023,40

Fonte: Autor (2018)

5.2 Caracterização do Regime de Chuvas

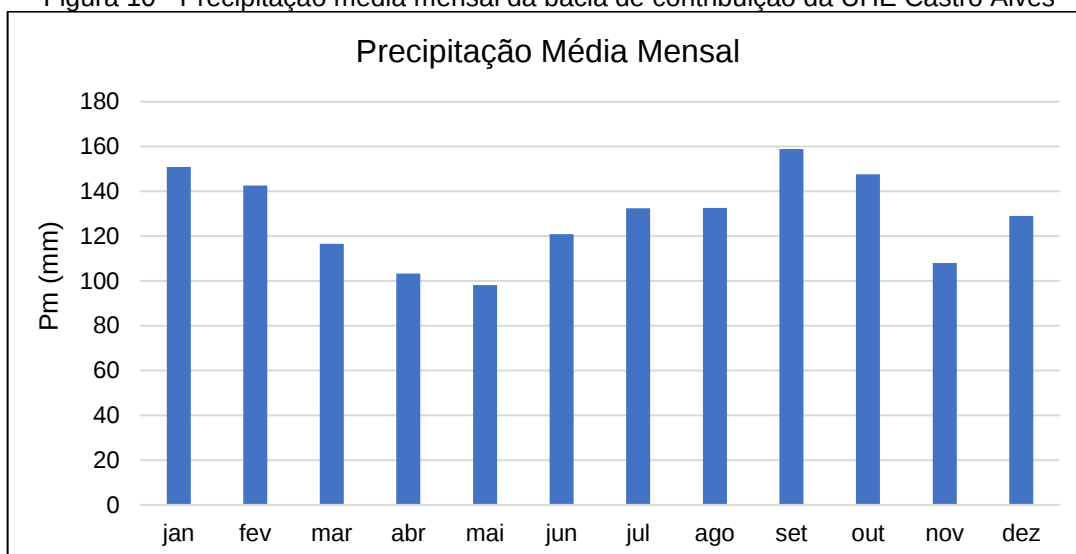
Na Figura 9 está apresentado o mapa com as áreas de influência de cada posto pluviométrico, utilizadas para calcular a precipitação média da bacia.



Fonte: Autor com base em IBGE Geociências, Weber et al e Hidroweb (2018)

A precipitação média mensal da bacia pode ser visualizada na Figura 10, onde verifica-se que setembro é o mês de maior precipitação, com valor médio de 158,9 mm, seguido dos meses de janeiro, outubro e fevereiro, com precipitações de 150,9 mm, 147,6 mm e 142,5 mm, respectivamente.

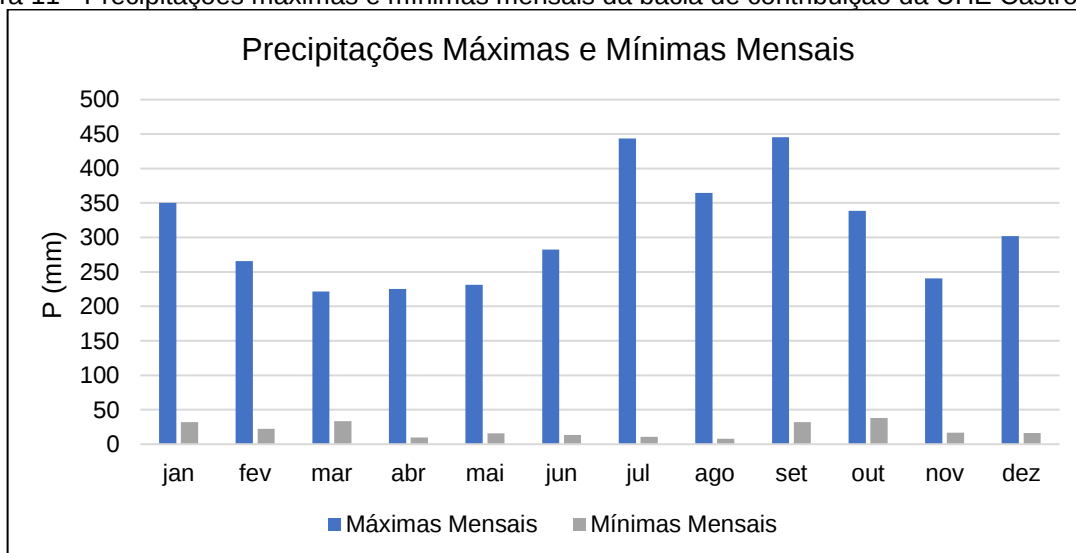
Figura 10 - Precipitação média mensal da bacia de contribuição da UHE Castro Alves



Fonte: Autor com base em Hidroweb (2018)

As precipitações máximas e mínimas mensais estão apresentadas no gráfico da Figura 11. Os meses de setembro e outubro possuem os maiores valores de precipitação máxima, sendo, respectivamente, 445,3 mm e 443,6 mm. Em relação as mínimas mensais os meses de agosto e abril apresentam os menores valores, sendo eles 8,1 mm e 9,8 mm, respectivamente.

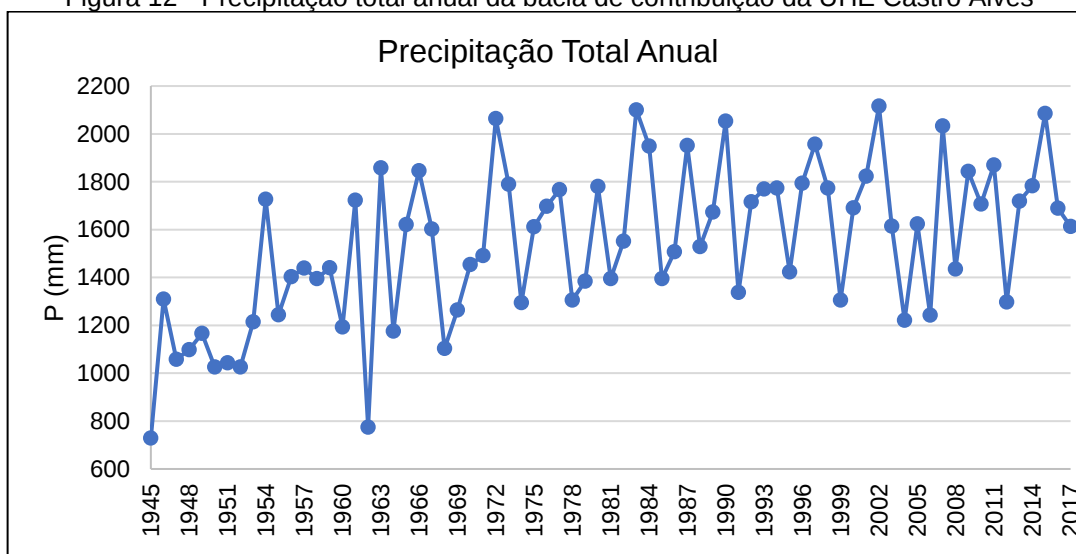
Figura 11 - Precipitações máximas e mínimas mensais da bacia de contribuição da UHE Castro Alves



Fonte: Autor com base em Hidroweb (2018)

Na Figura 12 está ilustrado o gráfico da precipitação total anual, sendo o maior valor observado no ano de 2002, com uma precipitação de 2116,10 mm, e o menor, no ano de 1962, com uma precipitação de 773,80 mm.

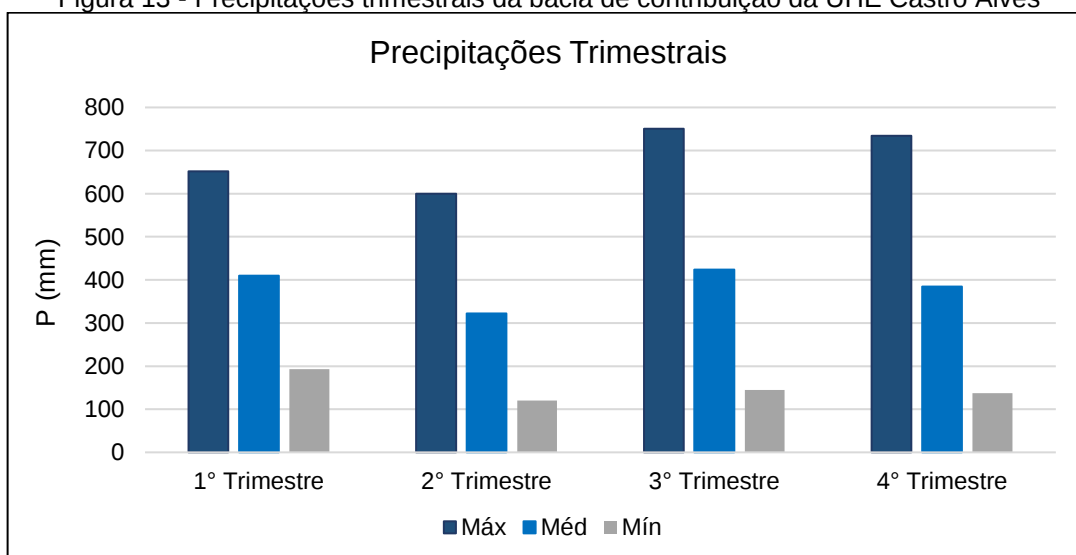
Figura 12 - Precipitação total anual da bacia de contribuição da UHE Castro Alves



Fonte: Autor com base em Hidroweb (2018)

A Figura 13 mostra o gráfico com as precipitações trimestrais máximas, médias e mínimas. Analisando o gráfico verifica-se que o terceiro trimestre, referente aos meses de julho, agosto e setembro, apresenta-se como o mais chuvoso, com uma precipitação média de 423,95 mm. Já o segundo trimestre, referente aos meses de abril, maio e junho, possui a menor precipitação média (322,27 mm), sendo assim o trimestre mais seco.

Figura 13 - Precipitações trimestrais da bacia de contribuição da UHE Castro Alves



Fonte: Autor com base em Hidroweb (2018)

5.3 Análise Exploratória dos Dados

Neste item são apresentados os resultados obtidos na análise exploratória dos dados das séries de precipitações e vazões médias.

5.3.1 Série de Precipitações

Na Tabela 6 estão apresentadas as estatísticas descritivas da série de precipitações totais anuais da bacia, obtidas a partir da média encontrada pelo método de Thiessen.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos dados de precipitações totais anuais: média ($\bar{X}$); mediana (X_{md}), desvio padrão (S^2); coeficiente de variação (cv)

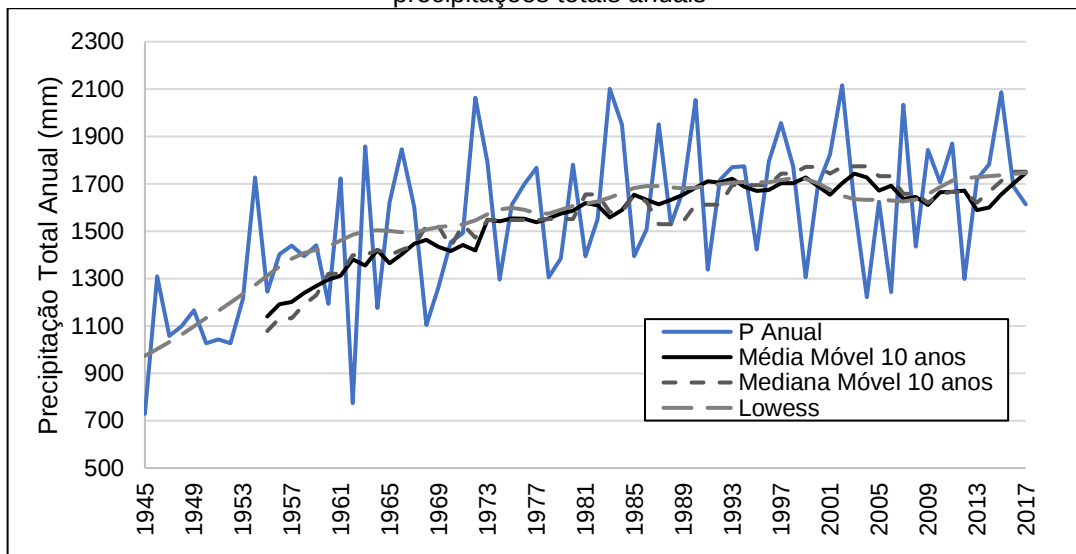
Precipitação	$\bar{X}$	X_{md}	S^2	cv
Período 1	1540,91	1602,24	318,90	0,21
Período 2	1299,23	1244,58	299,15	0,23
Período 3	1666,79	1694,50	248,57	0,15

Fonte: Autor (2019)

Analisando os resultados obtidos a partir da estatística descritiva, nota-se uma diferença significativa entre os períodos considerados. É possível observar um aumento de, aproximadamente, 28% e 37% nas médias e medianas, respectivamente, do período 3.

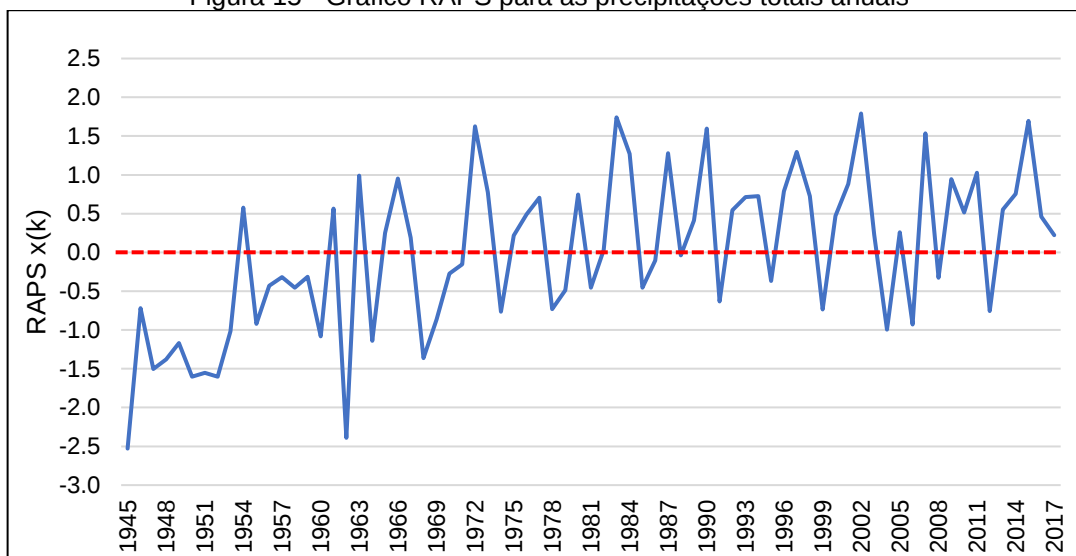
Nas Figuras 14 e 15 estão apresentados os gráficos da regressão LOWESS e das médias e medianas móveis de 10 anos, e o gráfico RAPS, respectivamente, para a série de precipitações totais anuais.

Figura 14 - Gráfico da regressão LOWESS e média e mediana móveis de 10 anos para as precipitações totais anuais



Fonte: Autor (2019)

Figura 15 - Gráfico RAPS para as precipitações totais anuais



Fonte: Autor (2019)

Em análise do gráfico apresentado na Figura 13, observa-se que as curvas suavizadoras demonstram uma leve tendência positiva para a série. Já na Figura 14, verificam-se dois picos ligeiramente mais pronunciados, sendo uma depressão entre os anos de 1960 e 1963, e outro uma elevação, próximo da década de 70, indicando uma possível mudança no padrão de precipitação nesses períodos. No primeiro caso, por se tratar de uma declividade negativa, pode ser indício de que precipitações anteriores ao ponto de mudança são menores. Enquanto a elevação próxima da

década de 70, por ser positiva, sugere um possível aumento das chuvas para o período posterior.

Alexandre et al. (2010), em estudo realizado na região metropolitana de Belo Horizonte, também identificaram, por meio do gráfico RAPS, uma mudança nas precipitações na década de 70. Além disso, Alexandre et al. (2010) detectaram com as curvas LOWESS uma tendência negativa nos dados de precipitação anual e uma tendência positiva para os trimestres mais secos. Akinsanola & Ogunjobi (2015), através das curvas de LOWESS verificaram, similarmente, um indício de tendência positiva para a série de precipitações anuais na Nigéria.

5.3.2 Série de Vazões

Na Tabela 5 estão apresentadas as estatísticas descritivas da série de vazões médias mensais.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas dos dados de vazões mensais: média ($\bar{X}$); mediana (X_{md}), desvio padrão (S^2); coeficiente de variação (cv)

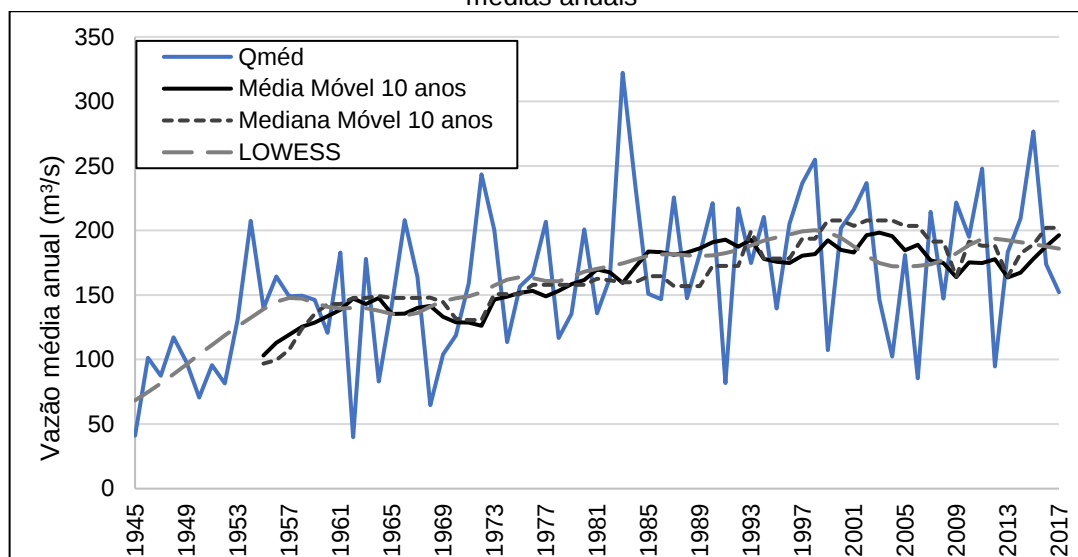
Vazão	$\bar{X}$	X_{md}	S^2	cv
Período 1	160,64	128,00	136,13	0,85
Período 2	122,70	93,50	109,80	0,89
Período 3	180,40	143,00	144,10	0,80

Fonte: Autor (2019)

Analisando os resultados da estatística descritiva, verifica-se que a série de vazões apresentou uma variação maior do que a série de precipitações, sendo os valores de coeficiente de variação em torno de 0,80 para vazão e 0,50 para precipitação. Há um aumento em torno de 48% e 53% nas médias e medianas, respectivamente, do período 3. O comportamento observado na série de vazões é semelhante ao da série de precipitações, sugerindo que o aumento das vazões está intimamente relacionado ao aumento das precipitações.

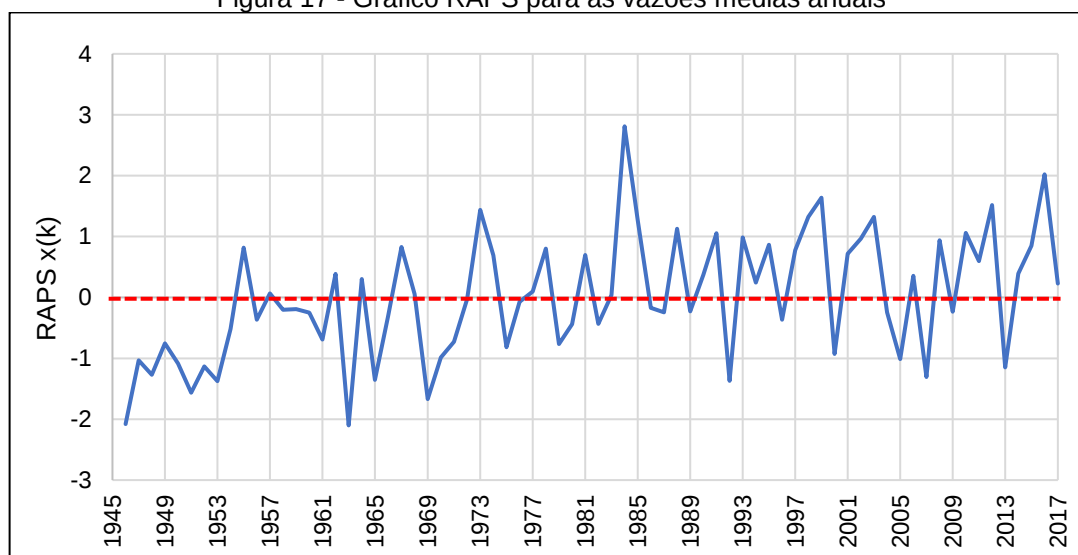
Nas Figuras 16 e 17 estão apresentados os gráficos da regressão LOWESS e das médias e medianas móveis de 10 anos, e o gráfico RAPS, respectivamente, para as vazões médias anuais.

Figura 16 - Gráfico da regressão LOWESS e média e mediana móveis de 10 anos para as vazões médias anuais



Fonte: Autor (2019)

Figura 17 - Gráfico RAPS para as vazões médias anuais

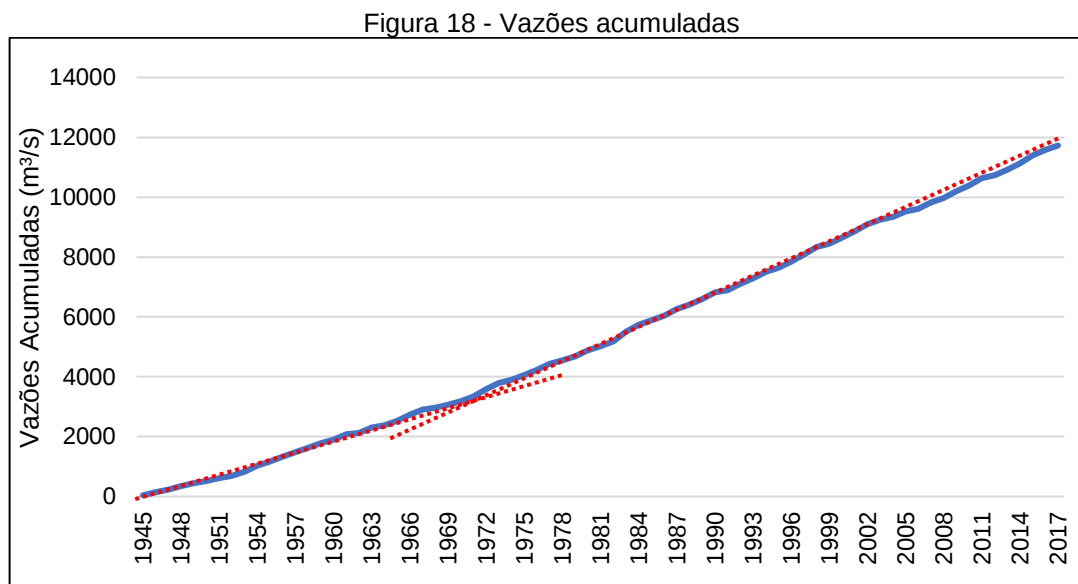


Fonte: Autor (2019)

Assim como nos dados de precipitação, observa-se, através das curvas suavizadoras, uma tendência positiva na série de dados de vazão. Em análise do gráfico RAPS nota-se uma depressão mais pronunciada entre os anos de 1961 e 1965, e dois picos, sendo um próximo do ano de 1973 e outro próximo da década de 80.

Comparando o gráfico RAPS das vazões com o de precipitações, verifica-se que a depressão para o período entre 61 e 65, bem como a elevação próxima do ano de 1973, coincidem. Como explicado anteriormente, estas declividades mais acentuadas no gráfico indicam uma possível mudança nas médias.

O gráfico das vazões médias acumuladas, apresentado na Figura 18, teve como objetivo corroborar com as observações realizadas nos gráficos anteriores.

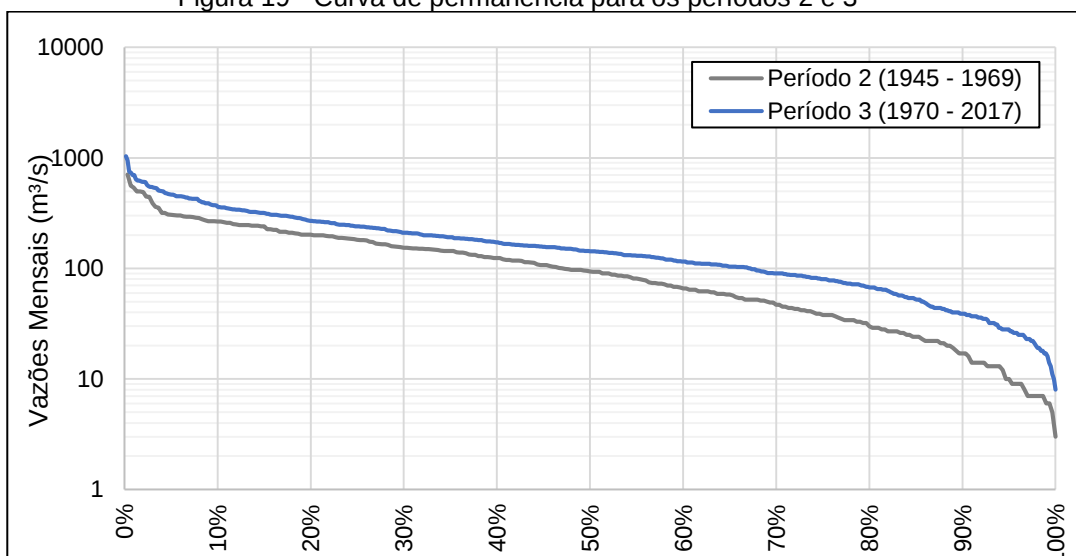


Fonte: Autor (2019)

Analisando o gráfico das vazões acumuladas, observa-se uma possível mudança ocorrendo próximo da década de 70, assim como observado com as curvas de regressão LOWESS e RAPS. Os resultados verificados na análise dos gráficos acima corroboram com os resultados obtidos na estatística descritiva, onde verificou-se um aumento nas médias e medianas do período posterior ao ano de 1970.

Foram construídas curvas de permanência, com intuito de verificar a variação das vazões máximas e mínimas. As curvas foram construídas para os períodos 2 e 3, sendo estes antes e após 1970, respectivamente. Na Figuras 19 estão apresentadas as curvas de permanência para os períodos citados.

Figura 19 - Curva de permanência para os períodos 2 e 3



Fonte: Autor (2019)

Analisando as curvas de permanência, verifica-se um aumento das vazões mínimas e máximas para o período posterior a 1970, corroborando com os resultados apresentados nas análises anteriores. Para o período anterior ao ano de 1970 a Q_{95} observada foi de 9,95 m³/s, enquanto para o período posterior foi de 27,75 m³/s. Em relação as vazões máximas, a Q_5 , no período que antecede o ano de 1970, foi de 304,05 m³/s, enquanto para o período posterior foi de 465,25 m³/s. Observa-se, no período posterior ao ano de 1970, um aumento de aproximadamente 179% para as vazões mínimas e 54% para as vazões máximas.

Os resultados obtidos com a análise exploratória permitem identificar uma tendência positiva, tanto nos dados de precipitação quanto nos de vazão. Através dos métodos gráficos utilizados, nota-se um comportamento semelhante para as variáveis hidrológicas estudadas, havendo indícios de possíveis pontos de mudança de comportamento entre o início dos anos 60 e 70.

Em concordância com as análises gráficas, verifica-se um aumento significativo nas médias de ambas as variáveis para o período posterior a 1970. Ainda, com a análise das curvas de permanência, constata-se um aumento nas vazões mínimas e máximas. Estes resultados indicam que o aumento das vazões esta, provavelmente, associado com o aumento das precipitações.

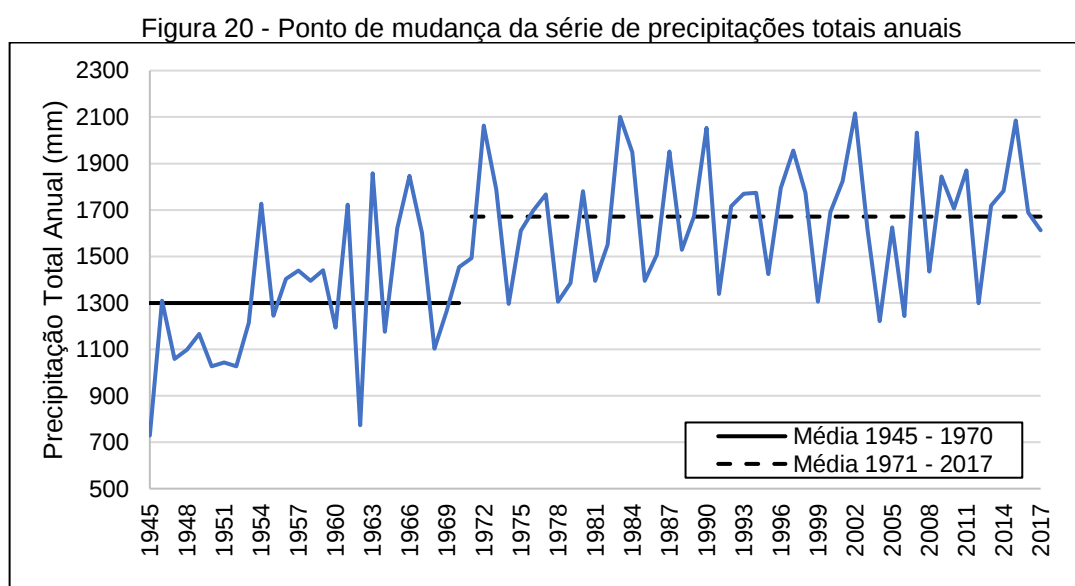
5.4 Aplicação dos Testes Estatísticos

Neste item são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos sete testes estatísticos nas séries hidrológicas. Foram adotadas as seguintes abreviações para os testes: t, para o teste t-Student; F, para o teste F-Snedecor; SP, para o teste do Coeficiente de Correlação de Spearman; CS, para o teste de Cox-Stuart; MW, para o teste Mann-Whitney e MK para o teste Mann-Kendall.

Os resultados dos testes serão apresentados através dos p-valores, sendo estes interpretados, para os testes bilaterais, como a probabilidade de retirada da mesma população uma estatística menor ou maior do que a observada com a amostra testada. Tendo em vista que a hipótese nula assume a estacionariedade das séries, quanto menor forem os p-valores maiores são as evidências de não-estacionariedade (DETZEL et al., 2011). Os valores destacados em **negrito** são referentes aos casos em que a hipótese nula foi aceita.

5.4.1 Série de Precipitações

Para identificação do ponto de mudança nos dados de precipitações totais anuais da bacia, obtidas a partir da média encontrada pelo método de Thiessen, foi utilizado o teste de Pettitt, cujo resultado está apresentado na Figura 20.



Fonte: Autor (2019)

O teste de Pettitt mostrou que o ponto de mudança na série de totais anuais ocorreu no ano de 1971 ($p < 0,001$). No gráfico da Figura 19 verifica-se a diferença das médias para o período antes e após o ponto de mudança indicado pelo teste. O resultado do teste de Pettitt está em concordância com o que foi apresentado anteriormente, na análise exploratória dos dados de precipitações totais anuais, onde em todos os casos foram observadas mudanças entre médias anteriores e posteriores ao ano de 1970.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do restante dos testes estatísticos para a série de precipitações totais anuais.

Tabela 8 - Resultados obtidos na análise estatística da série de precipitações totais anuais							
Período	p-valores						Resultado
	t	SP	CS	MW	MK	F	
Período 1	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,245	Não-Estacionária/Não homogênea
Período 2	0,038	0,012	0,388	0,026	0,013	0,412	Não-Estacionária/Não Homogênea
Período 3	0,508	0,402	0,839	0,385	0,355	0,788	Estacionária/Homogênea

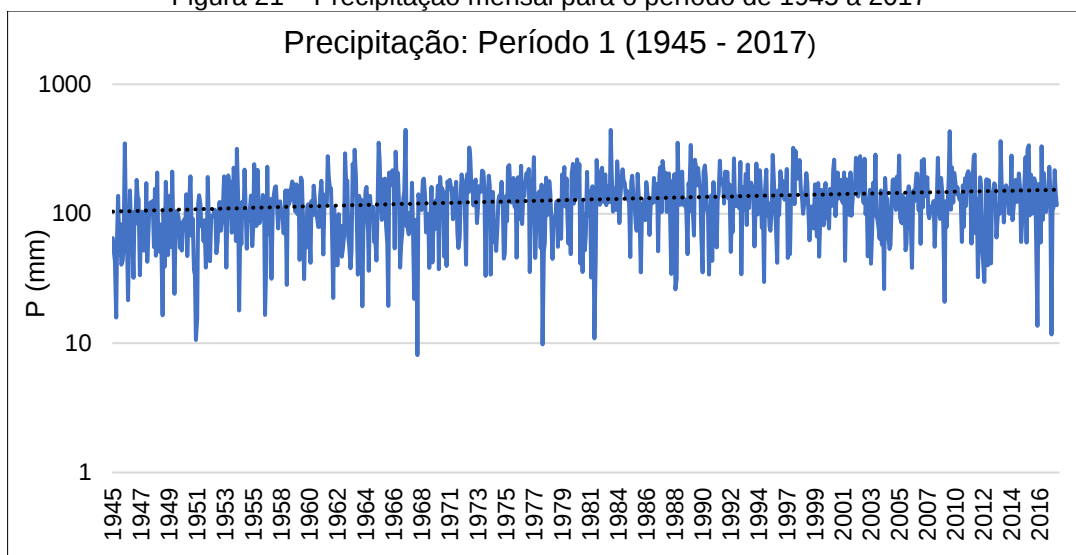
Fonte: Autor (2019)

A série completa de precipitações (período 1), possui indícios significativos de não-estacionariedade, verificado pelos p-valores bem baixos. Nota-se, para a série completa e período 2, que o resultado do teste F difere dos demais. Conforme Detzel et al. (2011), por se tratar de uma variável que mede a dispersão estatística em torno da média esse resultado demonstra que a faixa de variação se manteve, mesmo que as precipitações tenham apresentado tendência de aumento ou diminuição. O período 2, também apresenta indícios de não-estacionariedade, verificado pelos p-valores abaixo de 0,05.

Analisando o período posterior ao ano de 1970 (período 3), nota-se que para todos os seis testes aplicados se obteve como resultado p-valores acima de 0,05, indicando estacionariedade e homogeneidade da série de precipitações. De acordo com Naghettini & Pinto (2007), a homogeneidade significa que todos os elementos de uma amostra são oriundos de uma única população. Na análise de séries hidrológicas, as vezes há a ocorrência de mudanças abruptas nas médias, caracterizando uma heterogeneidade da série (BUISHAND, 1984), fato que não ocorreu para o período mais recente de análise (período 3).

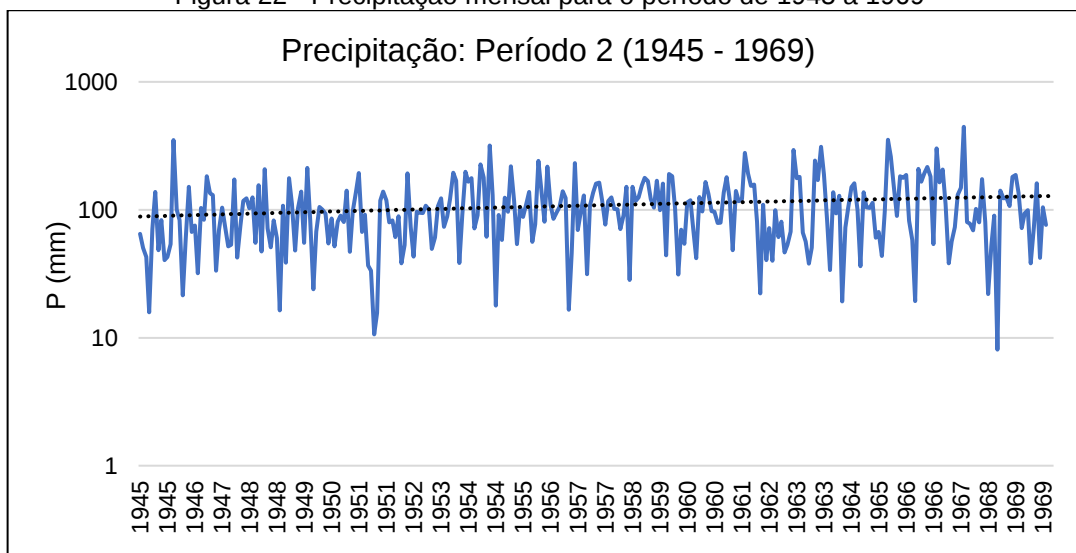
Nas Figuras 21, 22 e 23 estão ilustrados os gráficos, em escala logarítmica, da série completa de precipitações e dos dois períodos analisados. Para estes gráficos foi utilizada a série de precipitações totais mensais, visando melhor visualização e posterior comparação com os gráficos de vazões mensais.

Figura 21 – Precipitação mensal para o período de 1945 a 2017



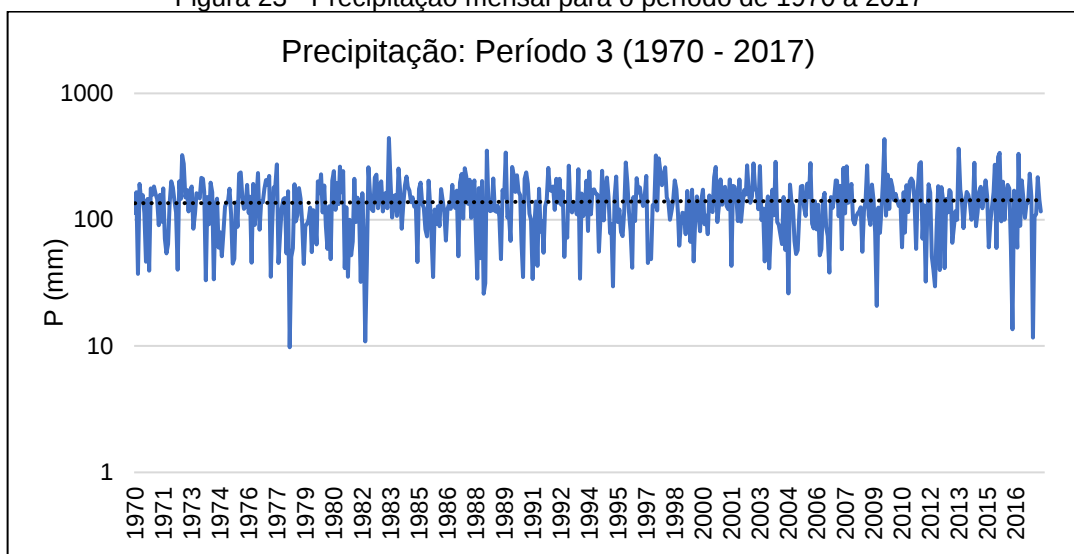
Fonte: Autor (2019)

Figura 22 - Precipitação mensal para o período de 1945 a 1969



Fonte: Autor (2019)

Figura 23 - Precipitação mensal para o período de 1970 a 2017



Fonte: Autor (2019)

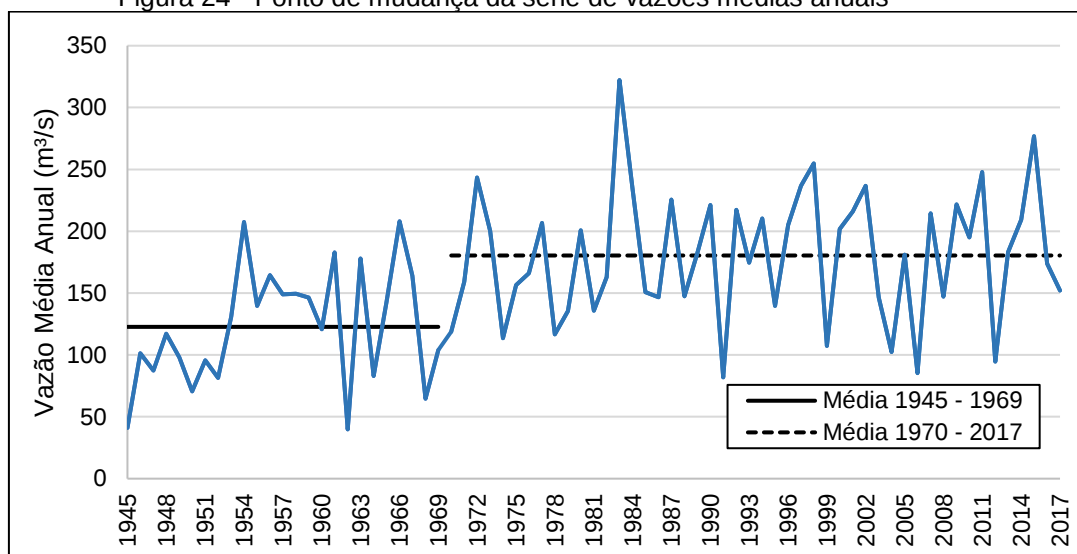
A linha de tendência nos três gráficos corrobora com os resultados obtidos nas análises estatísticas, sendo que para a série completa e período 2 foi verificado um aumento nas precipitações, corroborando, também, para aumento das vazões. Enquanto no gráfico referente ao período 3 não é observada tendência nos dados, confirmando o indício de estacionariedade da série.

Groppo et al. (2005), em estudo realizado em bacias do estado de São Paulo, também identificaram tendência positiva para a série de precipitação, referente ao período de 1947 a 1997. Pinheiro et al. (2013), em estudo realizado no Sul do Brasil, verificaram tendência positiva nos dados de precipitação, bem como aumento dos totais mensais e anuais para a maioria das estações analisadas. Já Rosin et al. (2015), verificaram tendências pouco significativas para as séries temporais de precipitação no estado de Mato Grosso. Os demais trabalhos que analisam tendência em dados de precipitação obtiveram resultados de ausência de tendência (MARENGO & ALVES, 2005; ALEXANDRE et al., 2010; BLAIN, 2010; ALCANTARA et al., 2019).

5.4.2 Série de Vazões

Para identificação do ponto de mudança nos dados de vazão média anual, referentes ao período de 1945 a 2017, foi utilizado o teste de Pettitt, cujo resultado está apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Ponto de mudança da série de vazões médias anuais



Fonte: Autor (2019)

O teste de Pettitt demonstrou que o ponto de mudança na série de vazões médias anuais ocorreu no ano de 1970 ($p < 0,001$). No gráfico da Figura 23 verifica-se a diferença das médias para o período antes e após o ponto de mudança indicado pelo teste. O resultado do teste de Pettitt corrobora com os resultados exibidos anteriormente na análise exploratória dos dados de vazão, onde, em todos os casos, foram observadas mudanças entre médias anteriores e posteriores ao ano de 1970.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do restante dos testes estatísticos para a série de vazões médias mensais.

Tabela 9 - Resultados obtidos na análise estatística da série de vazões médias mensais

Período	p-valores						Resultado
	T	SP	CS	MW	MK	F	
Período 1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Não-Estacionária/Não Homogênea
Período 2	0,023	0,036	0,190	0,096	0,027	0,028	Não-Estacionária/Homogênea
Período 3	0,343	0,587	0,479	0,502	0,616	0,517	Estacionária/Homogênea

Fonte: Autor (2019)

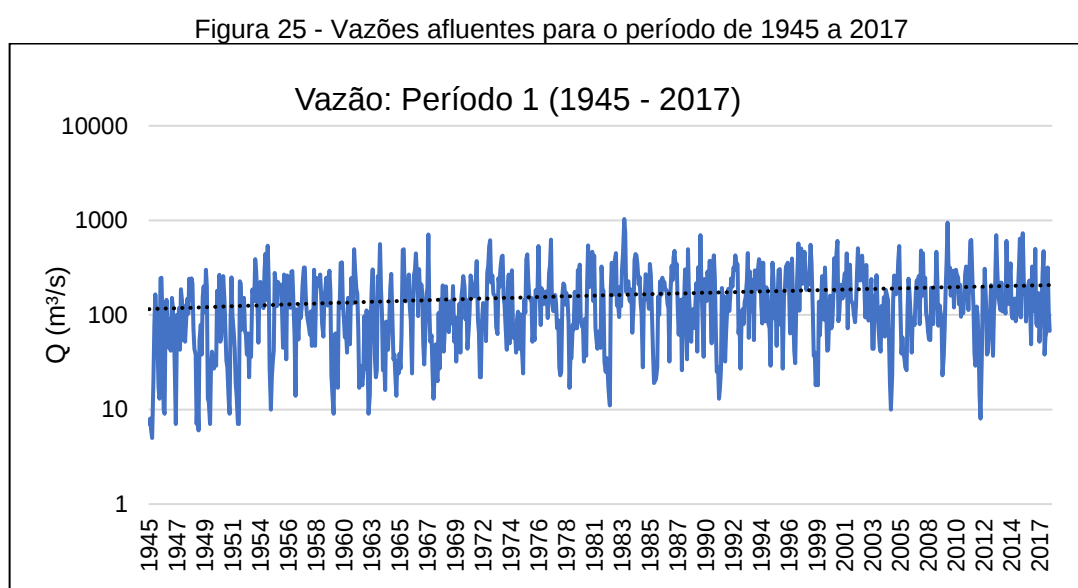
Os testes aplicados permitiram concluir que a série completa de vazões apresenta fortes indícios de não-estacionariedade, tendo em vista que os p-valores obtidos nos testes foram bem baixos. O período 2 também pode ser caracterizado como não-estacionário, no entanto os p-valores dos testes aplicados não foram tão baixos quanto os verificados para a série completa. Além disso, nota-se que os

resultados dos testes de Cox-Stuart e Mann-Whitney, para o período 2, destoaram dos demais. Detzel et al. (2011) também observaram discrepâncias nos resultados do teste de Cox-Stuart. O p-valor acima de 0,05 para o teste de Mann-Whitney é um indício de que a série é homogênea.

Analizando o período 3, verificam-se p-valores bem acima de 0,05, caracterizando o período posterior ao ano de 1970 como estatisticamente estacionário e homogêneo. Comparando com os resultados da série de precipitações, percebe-se que os indícios de não-estacionariedade e estacionariedade dos períodos analisados coincidem. No entanto, resultados obtidos na análise de períodos mais curtos podem apresentar características tendenciosas (BATISTA et al., 2009).

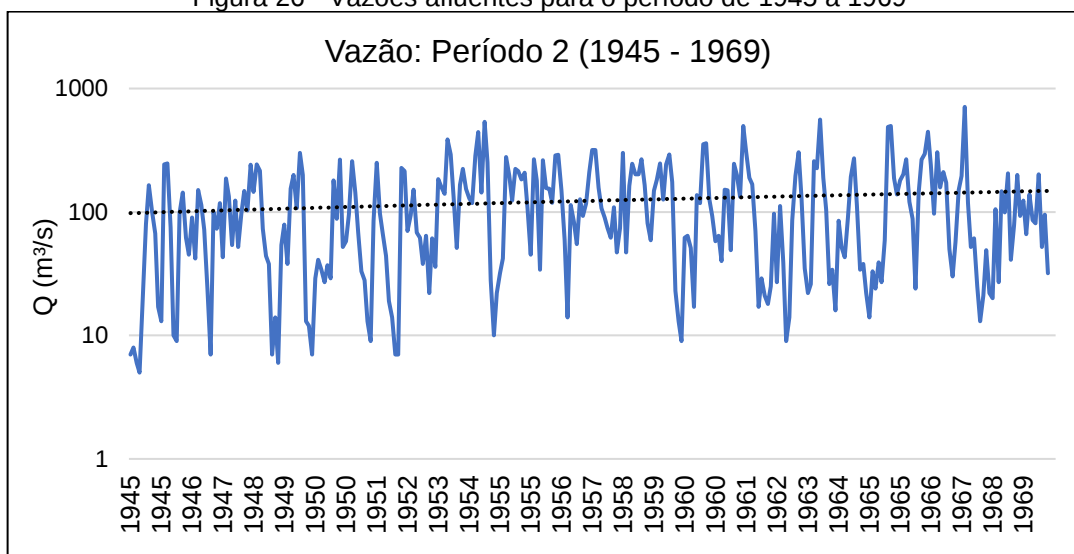
Tendo em vista que o cálculo dos volumes disponíveis para geração de energia depende das vazões afluentes ao reservatório, esta variável hidrológica é de grande importância para o planejamento energético (DETZEL et al., 2011). De acordo com Cossich et al. (2015), para que se tenha um planejamento efetivo as incertezas nas afluições futuras não devem ser desprezadas. Portanto, os resultados de não-estacionariedade podem ser fontes de erros e imprecisões em modelos hidrológicos, acarretando em consequências negativas para o planejamento da operação do reservatório da usina (DETZEL et al., 2011).

Nas Figuras 25, 26 e 27 estão apresentados os gráficos, em escala logarítmica, da série completa de vazões e dos dois períodos analisados.



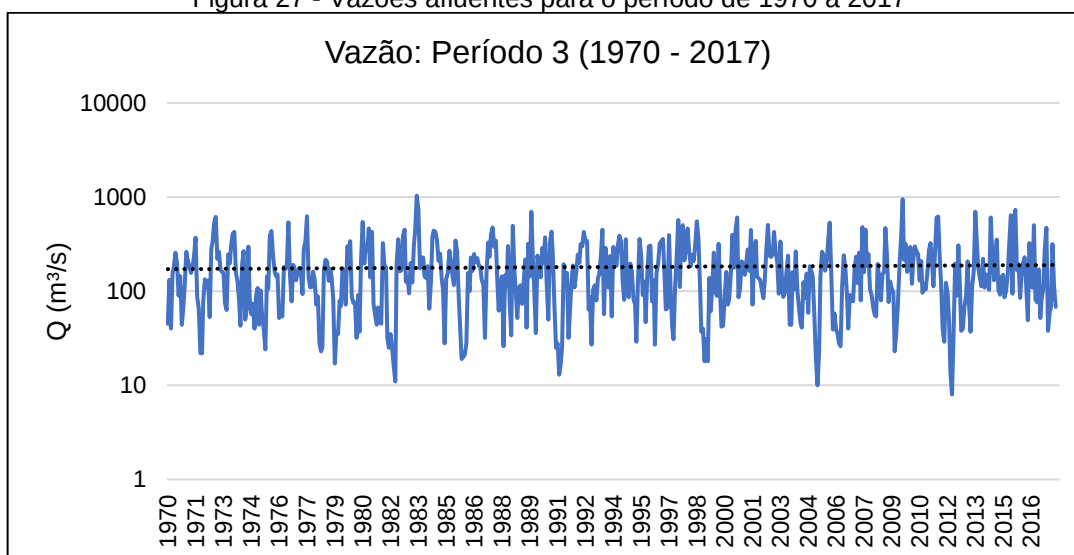
Fonte: Autor (2019)

Figura 26 - Vazões afluentes para o período de 1945 a 1969



Fonte: Autor (2019)

Figura 27 - Vazões afluentes para o período de 1970 a 2017



Fonte: Autor (2019)

Analisando os gráficos referentes a série de vazões, nota-se um comportamento semelhante aos de precipitação, com presença de tendência para a série completa (período 1) e período 2, e ausência para o período 3. Observa-se, na Figura 24 e 25, uma linha de tendência positiva, indicando um aumento das afluências. Tal resultado está em concordância com o que foi verificado na análise exploratória dos dados, onde constatou-se um aumento significativo das médias para o período posterior a 1970.

Em estudos anteriores, nota-se, com a aplicação de testes estatísticos, que as alterações em séries hidrológicas em diversas partes do mundo são significativas. Trabalhos realizados na América do Sul (Genta et al., 1997; Moraes et al., 1997; Müller

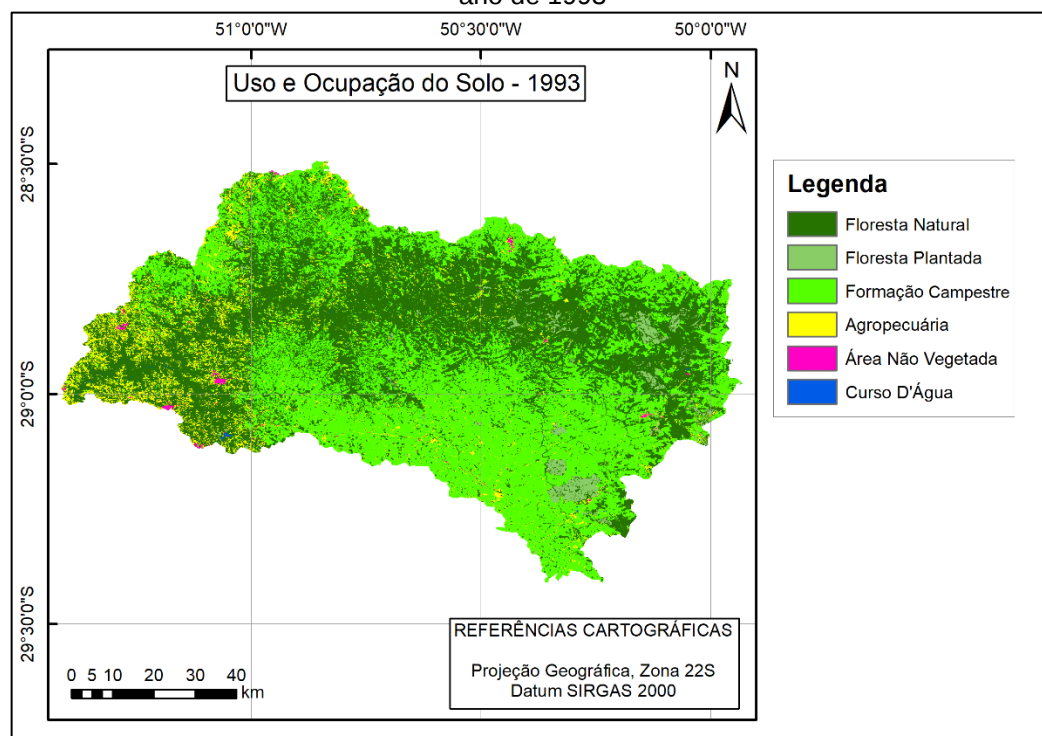
et al., 1998; Guetter e Prates, 2002; Sáfadi, 2004, entre outros) detectaram aumentos ou decréscimos nas afluições em diferentes estados, sendo, na maioria dos estudos, identificadas mudanças após a década de 70.

Batista et al. (2009) e Detzel et al. (2011), concluíram que a série de vazões da região Sul do Brasil são não-estacionárias com significância relevante. Sendo assim, as análises realizadas no presente estudo estão em conformidade com o apresentado por estes autores, tendo em vista que as séries completas de precipitação e vazão obtiveram indícios significativos de não-estacionariedade.

5.5 Alteração do Uso do Solo e Dados Diários

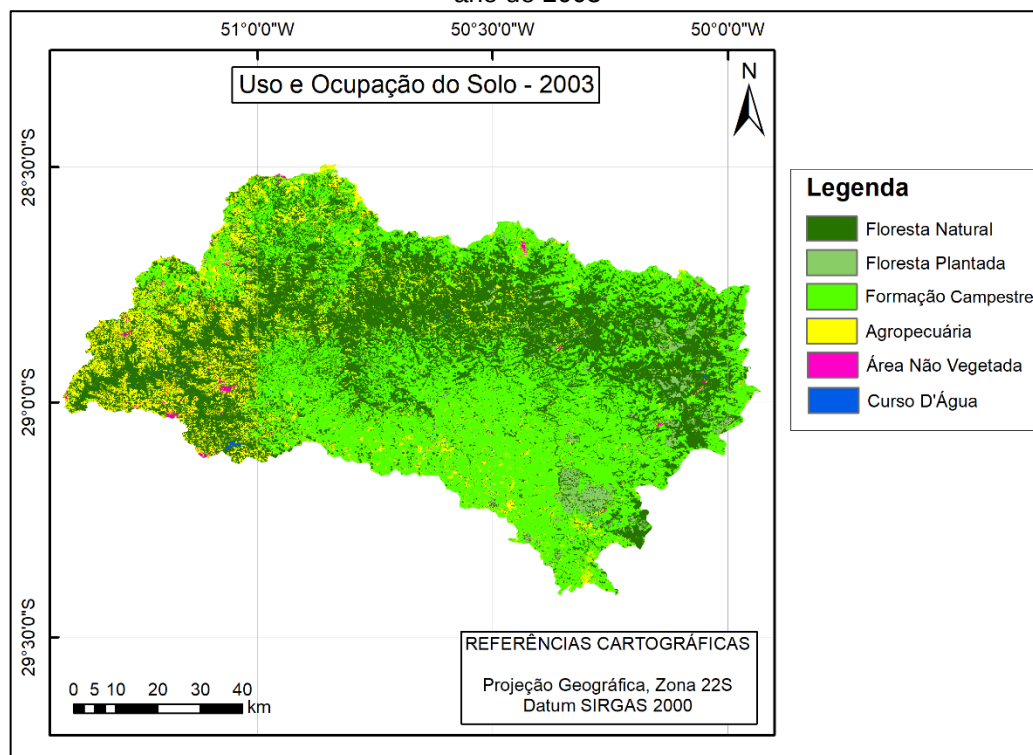
Nas Figuras 28 a 32 estão apresentados os mapas do uso e ocupação do solo da bacia, para os anos de 1993, 2003, 2013, 2016 e 2017, respectivamente. Na Tabela 10 estão apresentadas as porcentagens e áreas, em km², do uso e ocupação do solo para os respectivos anos.

Figura 28 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 1993



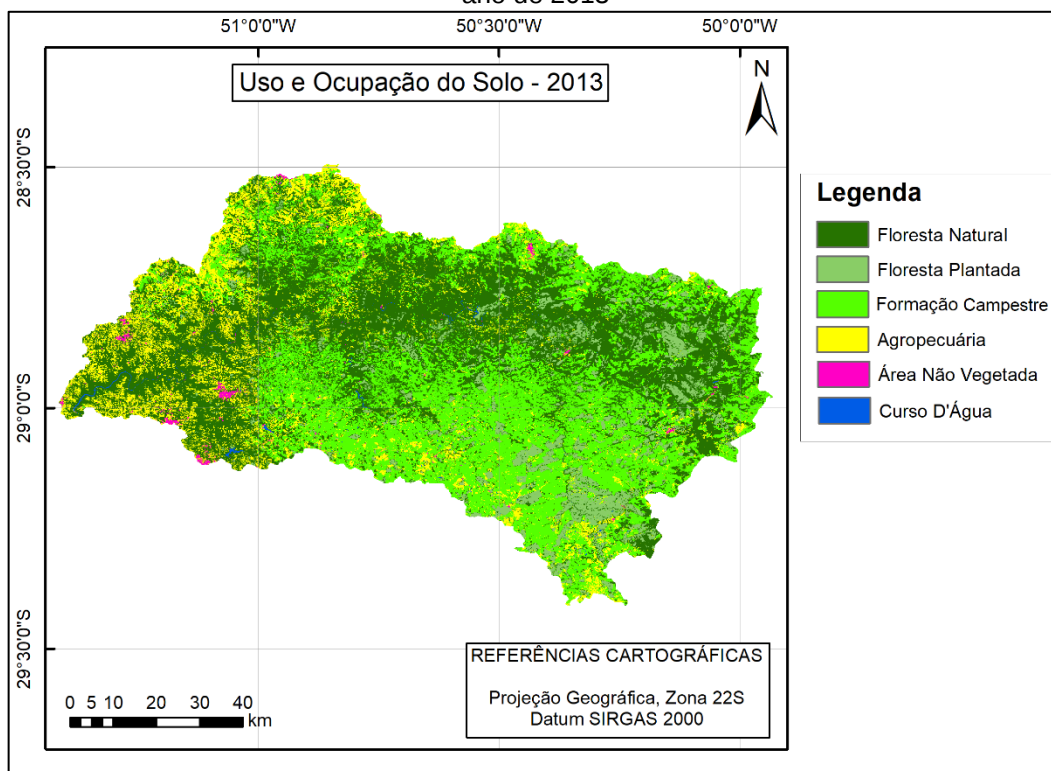
Fonte: Autor com base em MapBiomass (2018)

Figura 29 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2003



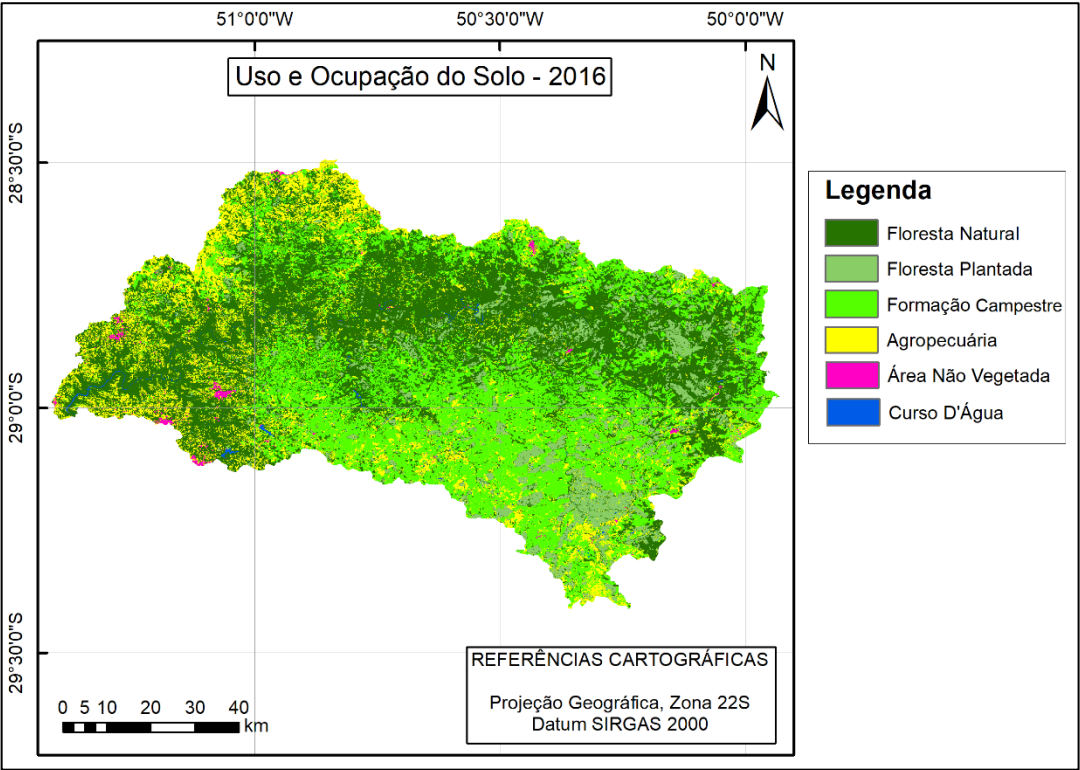
Fonte: Autor com base em MapBiomias (2018)

Figura 30 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2013



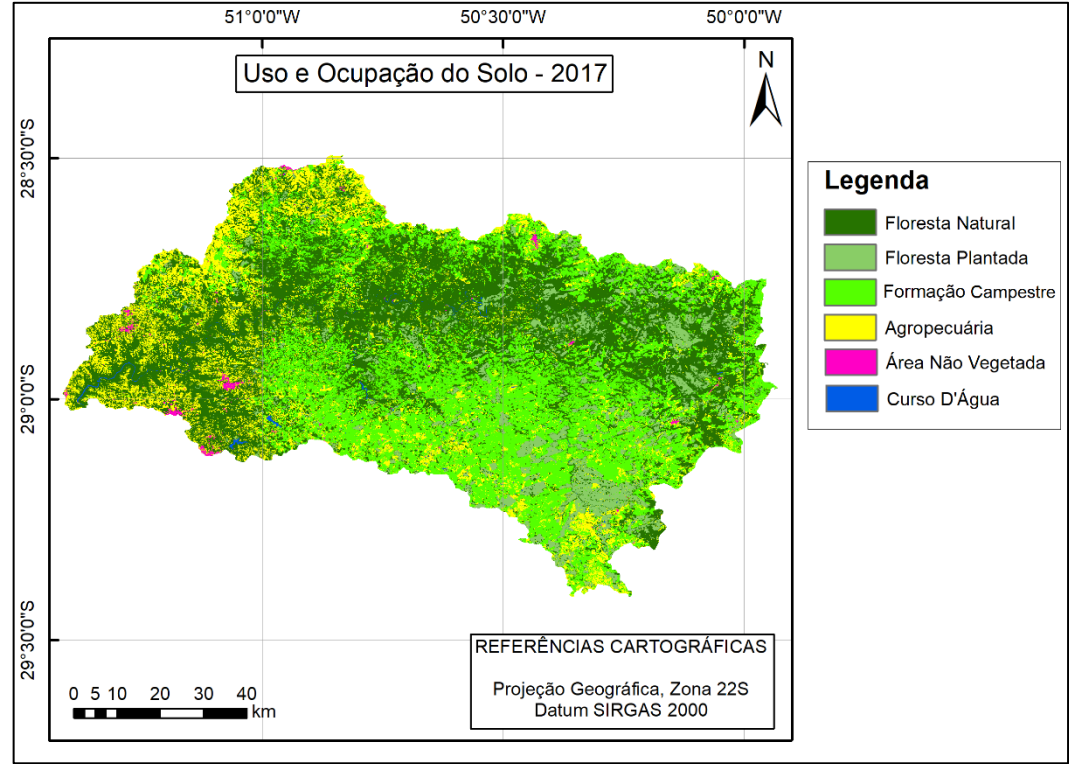
Fonte: Autor com base em MapBiomias (2018)

Figura 31 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2016



Fonte: Autor com base em MapBiomias (2018)

Figura 32 - Mapa do uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para o ano de 2017



Fonte: Autor com base em MapBiomias (2018)

Tabela 10 - Uso e ocupação do solo da bacia de contribuição da UHE Castro Alves para os anos de 1993, 2003, 2013, 2016 e 2017

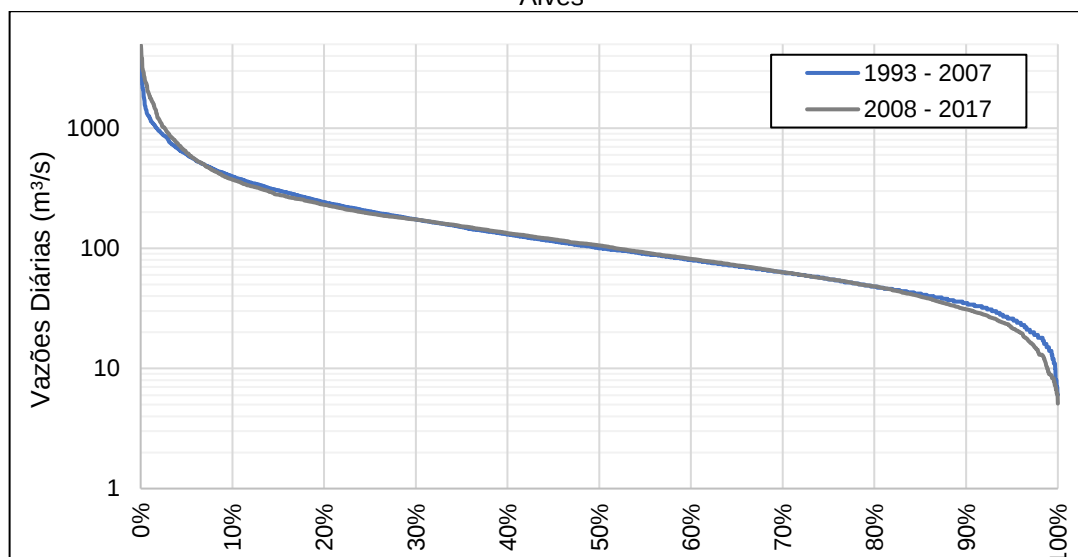
Ano\Classificação		Formação Natural	Floresta Plantada	Formação Campestre	Agropecuária	Área Não Vegetada	Curso D'Água
1993	%	44,97	2,04	45,95	6,66	0,31	0,07
	km²	3448,95	156,09	3525,21	500,15	23,45	5,24
2003	%	42,20	2,21	43,50	11,48	0,46	0,15
	km²	3235,46	168,79	3337,92	871,54	34,37	11,00
2013	%	43,01	7,82	35,19	13,12	0,56	0,30
	km²	3297,85	598,51	2701,14	997,22	42,15	22,17
2016	%	43,01	8,35	32,91	14,82	0,54	0,36
	km²	3302,15	639,36	2525,87	1123,40	41,13	27,06
2017	%	41,62	8,38	33,10	16,03	0,53	0,35
	km²	3197,70	640,66	2543,34	1211,08	39,94	26,41

Fonte: Autor com base em MapBiomias (2018)

Analisando o uso e ocupação do solo na bacia de contribuição da UHE Castro Alves, nota-se uma redução da formação natural ao longo dos anos, alterando de 45% (3.448,46 km²) em 1993 para 42% (3.197,70 km²) em 2017. Já para as categorias de floresta plantada e agropecuária, verifica-se um aumento, indo de 2 % (156,09 km²) e 7% (500,15 km²), em 1993, para 8% (640,66 km²) e 16% (1.211,08 km²) em 2017, respectivamente. Através das Figuras 27 a 31, nota-se um aumento significativo de áreas destinadas a agropecuária, sendo elas dispostas na região noroeste da bacia, onde está inserida a UHE.

Na Figura 33 estão apresentadas as curvas de permanência para as vazões diárias, referentes ao período anterior (1993 a 2007) e posterior (2008 a 2017) ao início da operação da UHE Castro Alves.

Figura 33 - Curva de permanência para os períodos antes e após início da operação da UHE Castro Alves

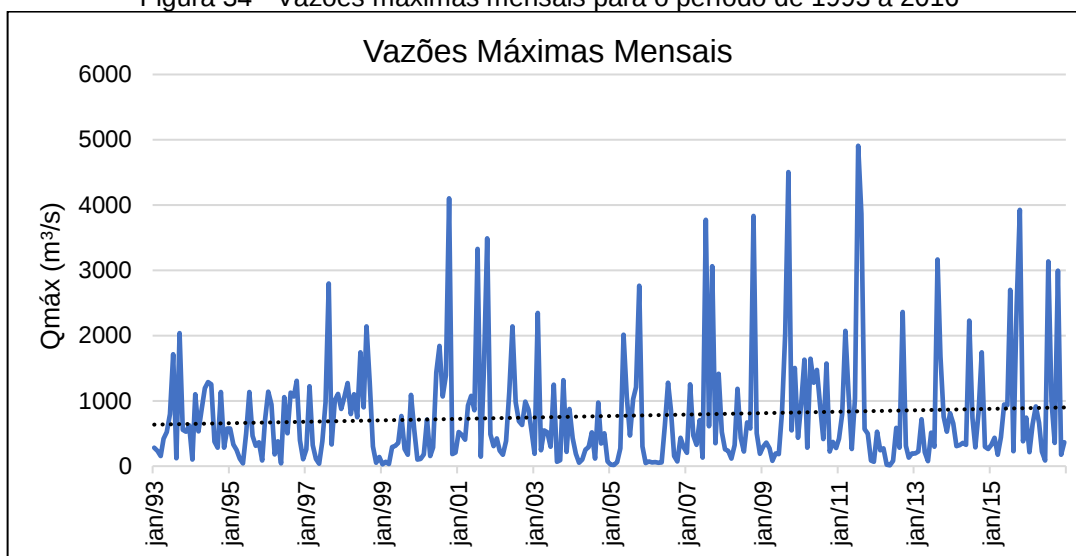


Fonte: Autor (2019)

Analisando as curvas de permanência para os períodos considerados, nota-se um aumento das vazões máximas (Q_5) após o início da operação da usina, indo de 607,00 m³/s para 622,41 m³/s. De acordo com Santos et al. (2016), o aumento das vazões máximas pode estar relacionado com a redução do tempo de concentração e atrito da água precipitada na bacia. Já em relação as vazões mínimas (Q_{95}), verifica-se uma redução para o período de 2008 a 2016, alterando de 26 m³/s para 21,79 m³/s. De acordo com Tucci & Clarke (1997), a redução das vazões mínimas pode ser explicada pela deterioração da infiltração após a remoção da vegetação natural. A redução da capacidade de infiltração acarreta em diminuição da alimentação do aquífero, e consequente aumento do escoamento superficial.

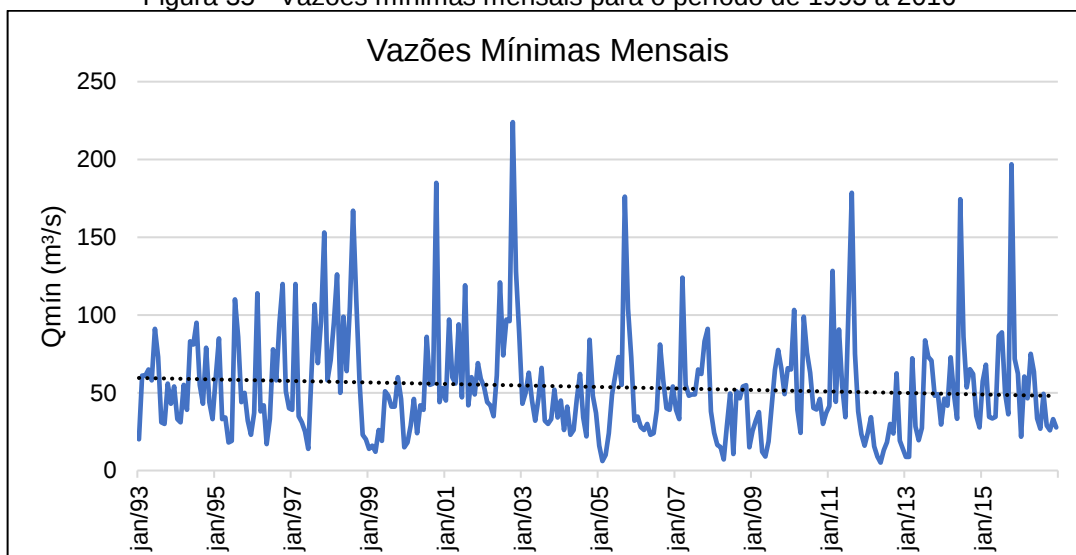
Nas Figuras 34 e 35 estão apresentados os gráficos das vazões máximas e mínimas, respectivamente, referentes ao mesmo período das vazões diárias.

Figura 34 - Vazões máximas mensais para o período de 1993 a 2016



Fonte: Autor (2019)

Figura 35 - Vazões mínimas mensais para o período de 1993 a 2016



Fonte: Autor (2019)

A linha de tendência nos gráficos acima indica um aumento das vazões máximas e redução das vazões mínimas, confirmando o que foi observado nas curvas de permanência. Estudos anteriores, como os apresentados por Labat et al. (2004) e Gedney et al. (2006), relacionaram o aumento das vazões com a precipitação. Já Bosh & Hewlett (1982), atribuíram o aumento das vazões a alterações na cobertura vegetal. Santos et al. (2016), da mesma forma, concluíram que a substituição da vegetação natural por pastagem na bacia é um dos principais fatores responsáveis pelo aumento das vazões máximas.

Através dos resultados apresentados no item 5.4, verificou-se que as séries de vazões médias mensais e precipitações totais anuais, a partir do período posterior a

década de 1970, podem ser caracterizadas como estacionárias. Portanto, alterações nas vazões médias mensais para o período de 1993 a 2017 não são perceptíveis. Nota-se, por meio da análise dos dados diários, pequenas alterações para as vazões máximas e mínimas na bacia, não sendo estas suficientes para alterar a estacionariedade da série. No entanto, a longo prazo, se este comportamento persistir as alterações nas vazões podem se tornar significativas, enquanto as chuvas podem se manter constantes.

5.6 Modelo de Simulação de Operação de Reservatório

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados da simulação da operação do reservatório da UHE Castro Alves.

Tabela 11 - Índices de desempenho do reservatório da UHE Castro Alves

Índice	Período 1		Período 2		Período 3	
	Q _{mín}	Q _{mín}	Q _{mín}	Q _{mín}	Q _{mín}	Q _{mín}
	FEPAM	Operação	FEPAM	Operação	FEPAM	Operação
Confiabilidade (α)	0,96	0,63	0,90	0,51	0,99	0,69
Resiliência (γ)	1,85	2,64	1,87	3,29	1,75	2,24
Vulnerabilidade (v)	1,98	30,51	2,71	36,86	-21,49	24,46

Fonte: Autor (2019)

Para o período 1, através do índice de confiabilidade (α) nota-se que o sistema atendeu satisfatoriamente a demanda prioritária da vazão mínima estabelecida pela FEPAM, funcionando sem apresentar falhas em 96% do tempo. Já para a vazão mínima de operação, a confiabilidade do sistema reduz, atendendo satisfatoriamente em conjunto com a demanda ambiental em 63% do tempo. Há uma redução de aproximadamente 34% da confiabilidade para atendimento da Q_{mín} de operação, necessária para manter pelo menos uma turbina ligada.

Quanto a resiliência (γ), para o período 1, verifica-se que para ambas as demandas o sistema apresentou valores baixos para este índice (1,85 e 2,64). Tais resultados indicam que o sistema demora para se recuperar quando uma falha ocorre. A vulnerabilidade (v) do sistema em relação a Q_{mín} da FEPAM foi bem baixa, apresentando um valor de 1,98. Já para a Q_{mín} de operação a vulnerabilidade do sistema aumenta para 30,51.

Comparando os resultados dos índices para o período 2 (série não-estacionária) e período 3 (série estacionária), nota-se, com o índice de confiabilidade, que para a série não-estacionária o sistema atendeu sem falhas a $Q_{\min}$ estabelecida pelo órgão ambiental em 90% do tempo. Para atendimento da $Q_{\min}$ de operação a confiabilidade do sistema cai para 51%. Já para a série estacionária, o sistema atende satisfatoriamente a $Q_{\min}$ estabelecida pela FEPAM em 99% do tempo, e a $Q_{\min}$ de operação em 69% do tempo.

Em relação a resiliência, o sistema para os períodos 2 e 3 apresentou comportamento semelhante, com índices baixos, indicando, assim como para a série completa, que o sistema demora para se recuperar quando ocorre uma falha. A vulnerabilidade do sistema, para o período 2, em relação a $Q_{\min}$ da FEPAM foi de 2,71. Já para a $Q_{\min}$ de operação a vulnerabilidade aumentou para 36,86. Nota-se, para o período 3, que o índice de vulnerabilidade em relação a $Q_{\min}$ da FEPAM é negativo (-21,49). Possivelmente este resultado relaciona-se com o fato de que o sistema não apresentou muitas falhas. Já para atendimento da $Q_{\min}$ de operação a vulnerabilidade aumenta para 24,46.

Analisando os resultados obtidos na simulação do período 2 e 3, verifica-se que o sistema se comportou de maneira mais satisfatória quando utilizada a série estacionária de vazões. Tanto para atendimento da $Q_{\min}$ da FEPAM quanto $Q_{\min}$ de operação o sistema apresentou maior índice de confiabilidade para o período posterior ao ano de 1970. Tais resultados indicam que a não-estacionariedade da série pode influenciar no desempenho do reservatório.

6 Conclusões

A alteração em séries de precipitação e vazão possuem impacto direto na geração de energia. Portanto, a detecção de tendência nas mesmas é de expressiva importância para a gestão dos recursos hídricos e melhor operação do reservatório das usinas.

Os resultados dos testes estatísticos nas séries completas das variáveis hidrológicas estudadas, permitem concluir que as mesmas são não-estacionárias e heterogêneas. O período referente a 1945 a 1969, assim como a série completa, pode ser caracterizado como não-estacionário. Já o período referente a 1970 a 2017, é estatisticamente estacionário e homogêneo para ambas as variáveis, apresentando um aumento significativo nas médias quando comparado com o período anterior a 1970. O comportamento semelhante das variáveis estudadas sugere que o aumento das vazões está intimamente relacionado com o aumento das precipitações. Em conformidade com estes resultados, identificou-se que a ruptura na série de precipitações totais anuais e na série de vazões médias mensais ocorreram nos anos de 1971 e 1970, respectivamente.

O uso e ocupação do solo na bacia de contribuição da UHE Castro Alves passou por significativas alterações ao longo dos anos estudados no presente trabalho, havendo uma redução da vegetação natural e aumento considerável de áreas destinadas a agropecuária. Em conjunto, verifica-se um aumento nas vazões máximas e redução das vazões mínimas diárias para o mesmo período. Este comportamento das vazões indica que a remoção da vegetação natural da bacia acarreta em uma maior compactação do solo, reduzindo a porcentagem de infiltração da água precipitada. Consequentemente, se tem uma redução da alimentação dos aquíferos, diminuindo as vazões mínimas, e aumento do escoamento superficial.

Tais resultados indicam que para o período posterior a 1970 as alterações nas vazões não são significativas para acarretar na não-estacionariedade da série. Entretanto, a longo prazo, se tal comportamento das vazões continuar, as alterações nas mesmas podem tornar-se significativas, mesmo que as precipitações se mantenham constantes. No entanto, para melhor entendimento do comportamento desta variável na bacia hidrográfica analisada, outras variáveis devem ser analisadas, tais como o coeficiente de escoamento e evapotranspiração. A falta da disponibilidade

de dados de uso do solo, bem como de vazões diárias, impossibilita uma análise mais precisa.

Através da simulação da operação do reservatório, com o *software* Acquanet, verificou-se que o sistema apresentou melhor desempenho para a série estacionária, referente ao período posterior a década de 1970. Sendo a confiabilidade do sistema, tanto para atendimento da $Q_{\min}$ da FEPAM quanto $Q_{\min}$ de operação da usina, maior do que a verificada para os períodos 1 e 2, onde as séries foram caracterizadas como não-estacionárias. Nota-se, também, uma redução na vulnerabilidade do sistema quanto utilizada a série estacionária de vazões. Tais resultados indicam que a não-estacionariedade da série de vazões pode influenciar no desempenho do reservatório.

Para se ter uma melhor avaliação da influência da não-estacionariedade no desempenho do sistema hídrico, é necessário realizar uma avaliação de qual método de remoção da não-estacionariedade seria mais adequado. E, posteriormente, realizar a simulação da operação do reservatório novamente, visando comparar os índices de desempenho obtidos utilizando as séries estacionárias geradas com os índices obtidos na análise apresentada nos resultados do presente trabalho.

Referências

AKINSANOLA, A. A.; OGUNJOBI, K. O. Recent homogeneity and long-term spatio-temporal rainfall trends in Nigeria. **Theor Appl Climatol**, 2015.

ALCÂNTARA, Lucas Ravellys Pyrrho et al. Análise de tendência para dados pluviométricos no município de Toritama – PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n.2, p. 130 – 139, 2019.

ALEMAW, B. F.; CHAOKA, T. R. Trends in the Flow Regime of the Southern African Rivers as Visualized from Rescaled Adjusted Partial Sums (RAPS). **African Journal of Science and Technology**, v. 3, n.1, p. 69 – 78.

ALEXANDRE, Gladstone; BAPTISTA, Márcio; NAGHETTINI, Mauro. Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 115-126, abr/jun. 2010.

ANA. Agência Nacional de Águas. (2018). Hidroweb – Séries Históricas de Estações. Disponível em:
<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em: 20 ago. 2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. (2019). Sistema de Acompanhamento de Reservatórios: Dados de Operação dos Reservatórios SIN. Disponível em:
<<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=22&dropDownListReservatorios=19081&dataInicial=01%2F01%2F1945&dataFinal=31%2F12%2F2017&button=Buscar>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. (2008). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ed. Brasília, ANEEL, 236 p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (2018). **Capacidade de geração do Brasil**. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>
Acesso em: 03 set. 2018.

ASFORA, Marcelo; CIRILO, José. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 27-38, jul/dez. 2005.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z. Modelo de Simulação e de Rede de Fluxo. In: PORTO, Rubem La Laina. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. 1 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. Cap. nº4, p. 165 – 227.

BARTIKO, Daniel; CHAFFE, Pedro Luiz Borges; BONUMÁ, Nadia Bernardi. Nonstationary in maximum anual daily streamflow series from Southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, e. 48, jul/set. 2017.

BATISTA, Alessandra Leite et al. Verificação da Estacionariedade de Séries Hidrológicas no Sul-Sudeste do Brasil. *In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Campo Grande – MS, p. 1 – 19, 2009.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 292 p.

BETHLAHMY, Nedavia. More streamflow after a bark beetle epidemic. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 28, p. 185 – 189, 1974.

BLAIN, Gabriel Constantino. Tendências e Variações Climáticas em Séries Anuais de Precipitação Pluvial do Estado de São Paulo. **Agrometeorologia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 765 – 770, 2010.

BERTONI, J.C. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 5 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013. Cap nº 5, p. 177 – 241.

BOSCH, J. M.; HEWLETT J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 55, p. 3 – 23, 1982.

BRANDÃO, João Luiz Boccia. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos**. 2004. 182 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2004.

BRAVO, Juan Martín. **Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão**. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2006.

BRAVO, Juan. **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. 2010. 226 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2010.

BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 26 dez. 1996.

BUISHAND, T. A. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 73, p. 51 – 69, 1984.

CERAN. Cia Energética Rio das Antas. (2018). Geração de Energia. Disponível em: < http://www.ceran.com.br/session/viewPage/pageId/59/language/pt_BR/>. Acesso em: 08 out. 2018.

CHENG, J.D. Streamflow Changes After Clear-Cut Logging of a Pine Beetle-Infested Watershed in Southern British Columbia, Canada. **Water Resources Research**, v. 25, n. 3, p. 449 – 456, 1989.

CLEVELAND, William S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, n. 368, p. 829 – 836.

COLLISHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: ABRH, 2013. 350 p.

COSSICH, William; CATALDI, Marcio; FILHO, Rotunno. Avaliação do desempenho da geração de cenários de aflúências em reservatórios utilizando previsões de precipitação por conjunto. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, p. 55 – 62, 2015.

COSTA, Marcos Heil; BOTTA, Aurélie; CARDILLE, Jeffrey. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, p. 206 – 217, 2003.

CUI, X.; LIU, S.; WEI, X. Impacts of forest changes on hydrology: a case study of large watersheds in the upper reaches of Minjiang River watershed in China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 4279 – 4290, nov. 2012.

DETZEL, Daniel H. Marco., et al. Estacionariedade das Aflúências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 95-111, jul/set. 2011.

DETZEL, Daniel H. Marcos. **Modelagem de séries hidrológicas**: uma abordagem de múltiplas escalas temporais. 2015. 214 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade do Paraná, 2015.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados**: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 646 p.

FILL, Heinz Dieter. Análise da Estacionariedade das Vazões do Rio Iguaçu em União da Vitória. In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió, p.1 - 7, 2011.

FREITAS, Marcos Airton de Sousa. Análise estatística dos parâmetros de secas e de cheias hidrológicas em rios intermitentes do semi-árido brasileiro. **Revista Tecnologia/Fortaleza**, Fortaleza, n. 18, p. 31-37, dez. 1997.

GEDNEY, N. et al. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. **Nature**, v. 439, p. 835 – 838, 2006.

GENTA, José L.; PEREZ-IRIBARREN, Gonzalo; MECHOSO, Carlos R. A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2858 – 2862, 1998.

GROPPO, Juliano Daniel et al. Análise de Séries Temporais de Vazão e Precipitação em Algumas Bacias do Estado de São Paulo com Diferentes Graus de Intervenções Antrópicas. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181 – 193, 2005.

GUETTER, Alexandre K.; PRATES, José E. Degrau climático nas séries de vazões das bacias brasileiras. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, p. 2099-2110, 2002.

HASHIMOTO, Tsuyoshi. Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14 – 20, 1982.

HE, Yanhu; LIN, Kairong; CHEN, Xiaohong. Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in the Dongjiang Basin of South China. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 1 – 14, 2013.

HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. **Times series modelling of water resources and environmental systems**. Amsterdam: Elsevier, 1994, 1054 p.

HSIA, Y. J.; KOH, C. C. Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. In: **Hydrology of Humid Tropical Regions**, Hamburg, 215 – 220, 1983.

KELMAN, Jerson et al. Hidreletricidade. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Org.). **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. Cap 16, p. 507-543.

KUNDZEWICZ, Zbigniew W.; ROBSON, Alice. **A Detecting trend and Other Changes in Hydrological Data**. World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD. n° 1013, Geneva, 168 p., 2000.

KUNDZEWICZ, Zbigniew W.; ROBSON, Alice. Change Detection in Hydrological Records – A Review of the Methodology. **Hydrological Sciences**, v. 49, n. 1, p. 7 – 19, 2004.

LABADIE, John W.; BODE, Dennis A.; PINEDA, Andrew M. Network model for decision support in municipal raw water supply. **Water Resources Bulletin**, v. 22, n. 6, p. 927 – 940, dez. 1986

LABADIE, John W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 93-111, mar/abr. 2004.

LABAT, David et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming. **Advances in Water Resources**, v. 27, p. 631 – 642, 2004.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidade. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 5 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013. Cap nº 4, p. 79 – 176.

MANN, H.B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, 18, p. 50-60, 1947.

MARENGO, José A.; TOMASELLA, Javier; UVO, Cintia R. Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D2, p. 1775-1783, jan. 1998.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln Muniz. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p. 215-226, mar. 2005.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>> Acesso em: 30 out. 2018.

MACHADO, Érica; GALVÃO, Carlos; FILHO, Francisco. Alocação Quali-quantitativa de Águas em Bacias Hidrográficas: Metodologia Multiobjetivo Inserida no Contexto da Gestão dos Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 213-227, abr/jun. 2012.

MELO, Cristiane Ribeiro de. **Análise do eixo leste da transposição do rio São Francisco face aos cenários de uso previstos**. 2010. 201 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

MENDES, Ludmilson. **O impacto dos usos consuntivos na operação de sistemas de reservatórios para produção de energia elétrica**. 2012. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Programa de Doutorado em Engenharia, 2012.

MOORE, R. Dan; WONDZELL, S. M. Physical hydrology and the effects of forest harvesting in the pacific northwest: a review. *Journal of the American Water Resources Association*, p. 763 – 784, 2005.

MORAES, Jorge M. et al. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 65-79, jul/dez. 1997.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MÜLLER, Arnaldo Carlos. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995. 412 p.

MÜLLER, Ingrid Illich; KRUGER, Cláudio Marchand; KAVISKI, Eloy. Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 51-71, out/dez. 1998.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

OLIVEIRA, Fernanda A. et al. Impacto do Uso das Vazões Naturais em Estudos Hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 191 – 197, jul/set. 2008.

ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>> Acesso em: 03 set. 2018a.

_____. **Sobre o ONS**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>> Acesso em: 03 set. 2018b.

PEDROSA, Valmir de Albuquerque; SOUZA, Roberaldo Carvalho de. Estacionariedade e estudo de vazões mínimas do rio Piraíba do Meio em Alagoas. In: **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, p. 1-14, 2009.

PETTITT, A. N. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. **Appl. Statist.**, v. 28, n. 2, p. 126 – 135, 1979.

PINHEIRO, Adilson; GRACIANO, Regina Luiza Gouvêa; SEVERO, Dirceu Luís. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3. p. 281 – 290, 2013.

ROCHA, Paulo Cesar. Indicadores de alteração hidrológica no Alto Rio Paraná: intervenções humanas e implicações na dinâmica do ambiente fluvial. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 1, p. 191-211, abr. 2010.

ROSIN, Cássia; AMORI, Ricardo Santos Silva; MORAIS, Tábata Saturnina Trindade de. Análise de tendências hidrológicas na bacia do rio das Mortes. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 991 – 998, 2015.

SÁFADI, Thelma. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de Furnas. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 142 – 148, 2004.

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROPPPO, Juliano Daniel; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64 – 73, 2016.

SANTOS, C. A. et al. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio Pardo. **Holos**, v. 7, p. 179 – 193, 2016.

SILVA, Tarciso Cabral da; ALENCAR, Maurício Bezerra. Análise da estacionariedade de séries de vazões na bacia do rio Gramame. In: **Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa, p. 1-15, 2001.

SOUZA, Nayara Silva de; SOUZA, Wanderley de Jesus; CARDOSO, Jossy Mara Simões. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 453 – 462, maio/jun 2017.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, n. 1, p. 72 – 101, 1904.

STE. Serviços Técnicos de Engenharia SA. (2012). Plano de Bacia Taquari Antas: Relatório Técnico Síntese – RS (Etapas A e B). 158 p.

TOZZI, Bruna Kiechaloski Miró. **Verificação da estacionariedade de séries hidrológicas de vazões na bacia do Rio Iguaçu**. 2014. 299 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, 2014.

TRÖGER, F. H.; PANTE, A. R. Análise de estacionariedade em séries de vazões naturais médias anuais de estações da bacia do rio Tapajós. In: **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, p. 1-20 2009.

TUCCI, Carlos E.M; CLARKE, Robin T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135-152, jan/jun. 1997.

LABSID. Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão (2013). **Acquanet: Modelo para Alocação de Água em Sistemas Complexos de Recursos Hídricos**. Manual do usuário, 2013.

WAGESHO, Negash; GOEL, N.K.; JAIN, M. K. Investigation of non-stationary in hydro-climatic variables at Rift Valley lakes basin of Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 444-445, p. 113-133, jun. 2012.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS, Centro de Ecologia, 2004. Disponível em <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>> Acesso em: 15 ago. 2018.

WELCH, B. L. The Generalization of Student's Problem when Several Different Population Variances are Involved. **Biometrika**, v. 34, n. ½, p. 28-35, 1947

WURBS, Ralph A. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 4, p. 455 - 472, 1993

YEAH, William. Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-Art Review. **Water Resources Research**, v. 21, n. 12, p. 1797 – 1818, 1985.

ZAMBON, Renato Carlos. **Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de grande porte**. 2008. 105 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2008.

ZAMBON, Renato Carlos. A operação dos reservatórios e o planejamento da operação hidrotérmica do Sistema Interligado Nacional. **Revista USP**, São Paulo, n. 104, p. 133-144, jan/fev/mar. 2015.

ZHAO, Fangfang; XU, Zongxue; ZHANG, Lu. Changes in streamflow regime following vegetation changes from paired catchments. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 1561 – 1573.