



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL (EECA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA (PPGEAS)

DENISE CHRISTINA DE REZENDE MELO

Estudos hidrológicos aplicados para avaliação de secas na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte

GOIÂNIA
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Denise Christina de Rezende Melo

3. Título do trabalho

ESTUDOS HIDROLÓGICOS APLICADOS PARA AVALIAÇÃO DE SECAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEIA PONTE

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Denise Christina De Rezende Melo, Discente**, em 27/09/2024, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Klebber Teodomiro Martins Formiga, Professor do Magistério Superior**, em 27/09/2024, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4849129** e o código CRC **DE90A91B**.

DENISE CHRISTINA DE REZENDE MELO

Estudos hidrológicos aplicados para avaliação de secas na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Escola de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão dos Sistemas de Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga

Coorientador: Prof. Dr. Nilson Clementino Ferreira

GOIÂNIA

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Melo, Denise Christina de Rezende
Estudos hidrológicos aplicados para avaliação de secas na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte [manuscrito] / Denise Christina de Rezende Melo. - 2024.
xv, 168 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga; co orientador Dr. Nilson Clementino Ferreira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2024.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Índices de seca. 2. Análises estatísticas. 3. Modelo hidrológico. I. Formiga, Klebber Teodomiro Martins, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 8/2024 a sessão de Defesa de Dissertação de Denise Christina de Rezende Melo, que confere o título de Mestre(a) em Engenharia Ambiental e Sanitária, na área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aos vinte sete dias do mês de setembro de dois mil e vinte e quatro, a partir da(s) 14h30min, por meio de videoconferência pelo link: <https://meet.google.com/erw-vjpy-gpj>, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “ESTUDOS HIDROLÓGICOS APLICADOS PARA AVALIAÇÃO DE SECAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEIA PONTE”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor Klebber Teodomiro Martins Formiga (EECA/UFMG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Eber José de Andrade Pinto (UFMG), membro titular externo; e o Professor Doutor Raviel Eurico Basso (EECA/UFMG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca não sugeriu alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Klebber Teodomiro Martins Formiga, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte sete dias do mês de setembro de dois mil e vinte e quatro.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por Klebber Teodomiro Martins Formiga, Professora do Magistério Superior, em 19/11/2024, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Raviel Eurico Basso, Professor do Magistério Superior, em 19/11/2024, às 17:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Eber José de Andrade Pinto, Usuário Externo, em 19/11/2024, às 20:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4977741 e o código CRC E636FA38.

Referência: Processo nº 23070.049535/2024-36

SEI nº 4977741

https://sei.ufg.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?BfN_KTEjqP17e30zgdLSeSaLLqdvCdB-IVobyM4PI2fSWQLJ... 1/2

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fornecer a força necessária a cada dia, iluminando meus caminhos. A quem dedico este trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga, pela orientação, paciência, apoio e contribuições fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Nilson Clementino Ferreira, que ministrou três disciplinas cursadas e pelas sugestões valiosas.

Ao meu esposo Henrique e minhas filhas Carolina e Isabel, que sempre me apoiaram nas horas difíceis.

Aos meus pais Edvar e Sônia, que me ensinaram o valor dos estudos. E minhas irmãs Adriana e Valéria, minhas amigas, que sempre me incentivaram.

Ao Serviço Geológico do Brasil, pelo apoio da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial e do Departamento de Hidrologia, com a liberação das horas de trabalho e disponibilidade da estrutura física durante todo o mestrado, onde aprendi a amar a Hidrologia. E aos meus colegas, destacando o Professor Dr. Eber José de Andrade Pinto, que me acompanhou como um coorientador durante todo o mestrado; o Pesquisador Mauro Campos Trindade, pela disposição em ajudar com os dados hidrológicos e compartilhamento de idéias; a bibliotecária Maria Gasparina de Lima, pela revisão das citações e referências desta dissertação; a Cristiane Pereira da cartografia, que ajudou com mapas, e a minha Gerente e Pesquisadora Vivian Fernandes, pelo incentivo e apoio.

Aos professores que ministraram as disciplinas cursadas: Dr. Paulo Sérgio Scalize, Dr. Raviel Eurico Basso e Dra. Juliana Dorn Nóbrega, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGEAS), Dr. Ricardo Limongi França Coelho, do Programa de Pós-Graduação em Administração (PPGADM), da Universidade Federal de Goiás, pessoas incríveis que contribuíram muito para meus conhecimentos.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi verificar a influência do uso do solo, dos usos da água e das mudanças climáticas, com alterações das precipitações nas vazões mínimas, ao longo do tempo, e fazer uma avaliação das secas, na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte. Foram utilizados dados hidrológicos de estações localizadas na bacia, pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para a análise das vazões mínimas, foi feita uma caracterização física e socioeconômica da bacia, realizadas análises estatísticas e simulação de vazões utilizando o modelo hidrológico HYMOD. Na avaliação das secas foram utilizados três índices de seca: Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Streamflow Index (SSI) e Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI). Os resultados indicaram significativas alterações no uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte ao longo do tempo, principalmente devido ao aumento das áreas urbanizadas e das áreas com agricultura irrigada. Além de redução das precipitações e aumento das temperaturas, podendo ser esse conjunto de fatores que causaram redução das vazões mínimas na bacia, ao longo dos anos. As análises estatísticas aplicadas às vazões e precipitações mostraram que a maioria das estações são não estacionárias, não homogêneas e dependentes, provavelmente devido a essas alterações antrópicas. Com a modelagem pode-se estimar vazões para os últimos 20 anos, sendo que vazões observadas ficaram abaixo das vazões simuladas, com destaque para 2015-2021, quando os valores diários ficaram abaixo das vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$. A avaliação das secas com índices de seca e vazões simuladas com o modelo hidrológico identificou os anos mais secos das séries históricas, podendo-se observar períodos em que ocorreram evolução de secas meteorológicas, hidrológicas, agrícolas até secas socioeconômicas.

Palavras-chaves: análises estatísticas, índices de seca, modelo hidrológico.

ABSTRACT

The objective of this study was to verify the influence of land use, water use, and climate change, with alterations in precipitation on minimum flows, over time, and to assess droughts, in the Meia Ponte River Watershed. Hydrological data from stations located in the basin, pertaining to the National Hydrometeorological Network and the National Institute of Meteorology (INMET), were used. For the analysis of minimum flows, a physical and socioeconomic characterization of the basin was conducted, along with statistical analyses and flow simulations using the HYMOD hydrological model. In the drought assessment, three drought indices were utilized: Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Streamflow Index (SSI), and Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI). The results indicated significant changes in land use in the Meia Ponte River Watershed over time, primarily due to the increase in urbanized areas and areas with irrigated agriculture. In addition to reduced precipitation and increased temperatures, this set of factors may have contributed to the decline in minimum flows in the basin over the years. The statistical analyses applied to flows and precipitation showed that most of the stations are non-stationary, non-homogeneous, and dependent, likely due to these anthropogenic changes. Modeling allowed for the estimation of flows for the last 20 years, with observed flows falling below the simulated flows, particularly from 2015 to 2021, when daily values remained below the reference flows Q_{95} and $Q_{7,10}$. The drought assessment using drought indices and simulated flows with the hydrological model identified the driest years in the historical series, revealing periods of meteorological, hydrological, agricultural, and even socioeconomic droughts.

Keywords: statistical analyses, drought indices, hydrological model

LISTA DE ABREVIACOES

AD	Anderson-Darling
AMS	American Meteorological Society
ANA	Agencia Nacional de águas e Saneamento Básico
APA	rea de Proteção Ambiental
APP	rea de Preservação Permanente
CBH-MP	Comit de Bacia Hidrográfica do Meia Ponte
CEMADEN Naturais	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres
CIMEHGO	Centro de Informações Meteorológicas e Hidrológicas de Goiás
CPRM	Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxignio
EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental
FAEG	Federação da Agricultura do Estado de Goiás
FIG	Federação da Indústria do Estado de Goiás
FNMA	Fundo Nacional do Meio Ambiente
FUNAPE/UFG	Fundação de Apoio  Pesquisa da Universidade Federal de Goiás
GCM	Modelos Climáticos Globais
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GR4J	Génie Rural model  4 paramtres Journaliers
GR5J	Génie Rural model  5 paramtres Journaliers
GWP	Global Water Partnership
HBV	Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IFAG	Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás
IFG	Instituto Federal de Goiás
KS	Kolmogorov-Smirnov
MML	Método dos momentos-L
MPP	Momentos ponderados por probabilidades
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAOSC	Plano de Atendimento e Operação em Situações Críticas
PBAP-GO	Planos de Bacias dos afluentes do Paranaíba do Estado de Goiás
SANEAGO	Saneamento de Goiás S. A.
SECIMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Cidades, Infraestrutura e Assuntos Metropolitanos.
SEMAD Sustentável	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento
SENAR	Servio Nacional de Aprendizagem Rural
SGB	Servio Geológico do Brasil
SIN	Sistema Interligado Nacional

SPEI	Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SSI	Standardized Streamflow Index
SWAT	Soil Water Assessment Tool
TOPMODEL	Topography Based Hydrological Model
UFG	Universidade Federal de Goiás
UPGRH	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
WEF	Water, Energy, Food
WMO	World Meteorological Organization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Situação do Rio Meia Ponte no mês de setembro de 2017	26
Figura 2 - Estrutura do modelo hidrológico HYMOD	51
Figura 3 - Sucessão temporal de uma seca e seus impactos	55
Figura 4 - Distribuição normal com o SPI tendo média 0 e variância 1	59
Figura 5 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte	63
Figura 6 - Perfil longitudinal do Rio Meia Ponte da nascente até a foz.	64
Figura 7 - Variação das precipitações acumuladas na estação Goiânia (INMET).....	65
Figura 8 - Mapa de isoietas dos totais anuais de precipitação na Bacia do Rio Meia Ponte	66
Figura 9 - Biomas presentes na Bacia do Rio Meia Ponte.....	67
Figura 10 - Disponibilidade hídrica subterrânea na Bacia do Rio Meia Ponte.....	69
Figura 11 - Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte.....	70
Figura 12 - Mapa de classificação de uso do solo na Bacia do Rio Meia Ponte.....	71
Figura 13 - Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas	74
Figura 14 - Uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Meia Ponte nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2022.....	84
Figura 15 - Área ocupada por classe (%) na Bacia do Rio Meia Ponte (1985-2022).....	85
Figura 16 - Crescimento das áreas ocupadas por classe (ha) na Bacia do Rio Meia Ponte (1985 – 2022)	86
Figura 17 - Áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte por município (1990 – 2022)87	
Figura 18 - Áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte (1990 – 2022).....	87
Figura 19 - Área totais irrigadas em 2022 e projeção para 2040 por município na Bacia do Rio Meia Ponte	88
Figura 20 - Área ocupada por sistemas de irrigação em Goiás (1985-2021).....	88
Figura 21 - Precipitações totais anuais médias na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte	89
Figura 22 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Aragoiânia à distribuição Gama ..	102
Figura 23 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Goianópolis à distribuição Gama.	102
Figura 24 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Inhumas à distribuição Gama.	103
Figura 25 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Ouro Verde à distribuição Gama.	103
Figura 26 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Trindade à distribuição Gama.....	104
Figura 27 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Joviânia à distribuição Gama.....	104
Figura 28 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Morrinhos à distribuição Gama. ...	105
Figura 29 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Pontalina à distribuição Gama.....	105
Figura 30 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Cromínia à distribuição Gama.....	106
Figura 31 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Gama	106
Figura 32 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Goiânia à distribuição Logística ..	107
Figura 33 - Temperaturas médias da Estação Goiânia (1961 – 2023).....	108
Figura 34 - Variação das temperaturas máximas em estações no estado de Goiás.....	108
Figura 35 - Variação das temperaturas mínimas em estações no estado de Goiás	109
Figura 36 - Variação da umidade relativa em estações no estado de Goiás	110
Figura 37 - Variação da evaporação em estações no estado de Goiás.....	111
Figura 38 - Vazões mínimas médias de 7 dias na Bacia do Rio Meia Ponte.....	112
Figura 39 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias de 90 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1974 a 2022).....	113
Figura 40 - Precipitações totais anuais da estação Goiânia e vazões mínimas médias anuais de 7 dias das estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia (1976 a 2022).	114
Figura 41 - Precipitações totais da estação Goiânia e vazões médias de 90 dias das Estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia - (1976 a 2022).....	115
Figura 42 - Precipitações totais da estação Goiânia e vazões médias de 180 dias.....	115
Figura 43 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias anuais de 7 dias da Estação Inhumas (1948 a 2022)	116
Figura 44 - Precipitações totais e vazões médias de 90 dias da Estação Inhumas (1948 a 2022).....	116
Figura 45 - Precipitações totais e vazões médias de 180 dias da Estação Inhumas (1948 - 2022).....	117
Figura 46 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias anuais de 7 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).....	117
Figura 47 - Precipitações totais e vazões médias de 90 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).....	118

Figura 48 - Precipitações totais e vazões médias de 180 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).	118
Figura 49 - Ajuste das vazões mínimas médias de 7 dias da estação Inhumas à distribuição Weibull (2 parâmetros)	120
Figura 50 - Ajuste das vazões mínimas médias de 7 dias da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Weibull (2 parâmetros)	121
Figura 51 - Ajuste das vazões mínimas médias de 90 dias da estação Inhumas à distribuição Weibull (2 parâmetros)	121
Figura 52 - Ajuste das vazões mínimas médias de 90 dias da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Weibull (2 parâmetros)	122
Figura 53 - Curva de Permanência de vazões da Estação Inhumas (1948-2023)	131
Figura 54 - Curva de Permanência de vazões da Estação Montante de Goiânia (1974-2023)	132
Figura 55 - Curva de Permanência de vazões da Estação Jusante de Goiânia (1978-2023)	132
Figura 56 - Curva de Permanência de vazões da Estação Ribeirão das Caldas (1978-2028)	133
Figura 57 - Curva de Permanência de vazões da Estação Fazenda Sucuri (1980-2023)	133
Figura 58 - Curva de Permanência de vazões da Estação Professor Jamil (1978-2023)	134
Figura 59 - Curva de Permanência de vazões da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2023)	134
Figura 60 - Vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ e vazões diárias de Inhumas (1948-2023)	135
Figura 61 - Vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ e vazões diárias de Ponte Meia Ponte (1953-2023)	135
Figura 62 - Níveis críticos do Rio Meia Ponte no período 2017 a 2023	138
Figura 63 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Ponte Meia Ponte	139
Figura 64 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Inhumas	140
Figura 65 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Montante de Goiânia	140
Figura 66 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Jusante de Goiânia	141
Figura 67 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Ribeirão das Caldas	141
Figura 68 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Fazenda Sucuri	142
Figura 69 - Vazões observadas e as vazões simuladas da estação Professor Jamil	142
Figura 70 - Resultados dos índices de seca SPI e SPEI - Estação Goiânia (INMET)	144
Figura 71 - Resultados dos índices de seca SPI e SSI - Estação Inhumas	145
Figura 72 - Resultados dos índices de seca SPI e SSI - Ponte Meia Ponte	146
Figura 73 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Inhumas com as vazões simuladas (1995-2022)	148
Figura 74 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ponte Meia Ponte com as vazões simuladas (1974-2023)	149
Figura A1 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Aragoiânia (1974-2022)	167
Figura A2 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Goianópolis (1974-2022)	168
Figura A3 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Inhumas (1974-2022)	169
Figura A4 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Ouro Verde (1974-2022)	170
Figura A5 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Trindade (1974-2022)	171
Figura A6 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Morrinhos (1974-2022)	172
Figura A7 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Joviânia (1974-2022)	173
Figura A8 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Pontalina (1974-2022)	174
Figura A9 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Cromínia (1974-2022)	175
Figura A10 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Ponte Meia Ponte (1974-2022)	176
Figura A11 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Inhumas (1948-2022)	177
Figura A12 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Montante de Goiânia (1974-2022)	178
Figura A13 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Jusante de Goiânia (1974-2022)	179
Figura A14 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ribeirão das Caldas (1974-2022)	180
Figura A15 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Fazenda Sucuri (1974-2022)	181
Figura A16 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Professor Jamil (1974-2022)	182
Figura A17 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ponte Meia Ponte (1974-2022)	183

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros do modelo HYMOD.....	52
Quadro 2 - Valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	59
Quadro 3 - Características da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte	64
Quadro 4 - Dados das estações pluviométricas selecionadas para o estudo.....	75
Quadro 5 - Dados das estações pluviométricas selecionadas para o estudo	75
Quadro 6 - Dados das estações pluviométricas de apoio.....	75
Quadro 7 - Áreas ocupadas por classe (ha) na Bacia do Rio Meia Ponte - 1985 a 2022.....	86
Quadro 8 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Aragoiânia (1974-2022).....	91
Quadro 9 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Goianópolis (1974-2022).....	92
Quadro 10 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Inhumas (1974-2022).....	93
Quadro 11 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Ouro Verde (1974-2022).....	94
Quadro 12 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Trindade (1974-2022).....	95
Quadro 13 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Joviânia (1974-2022).....	96
Quadro 14 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Morrinhos (1974-2022).....	97
Quadro 15 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Pontalina (1974-2022).....	98
Quadro 16 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Crominia (1974-2022).....	99
Quadro 17 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2022).....	100
Quadro 18 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Goiânia (1961-2022).....	101
Quadro 19 - Valores dos quantis associados aos Tempos de retorno (T) para Precipitação total anual das estações em estudo na Bacia do Rio Meia Ponte.....	107
Quadro 20 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Inhumas (1948-2022).....	123
Quadro 21 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Montante de Goiânia (1974-2022).....	124
Quadro 22 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Jusante de Goiânia (1974-2022).....	125
Quadro 23 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Ribeirão das Caldas (1974-2022).....	126
Quadro 24 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Fazenda Sucuri (1974-2022).....	127
Quadro 25 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Professor Jamil (1974-2022).....	128
Quadro 26 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2022).....	129
Quadro 27 - Valores dos quantis associados aos Tempos de retorno (T) para vazões mínimas médias de 7 dias e 90 dias das Estações Inhumas e Ponte Meia Ponte	130
Quadro 28 - Vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{95} referentes às estações selecionadas.....	131
Quadro 29 - Demandas e cargas poluidoras do doméstico, agricultura e pecuária na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte.....	137
Quadro 30 - Parâmetros obtidos do modelo HYMOD - Estação Ponte Meia Ponte	138
Quadro 31 - Valores obtidos do coeficiente NSE para as vazões simuladas da estação Ponte Meia Ponte	139
Quadro 32 - Valores obtidos para a eficiência NSE para as vazões simuladas das estações selecionadas	143

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES ANTRÓPICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS	19
2.2 EXEMPLOS DE ESTIAGENS SEVERAS QUE OCORRERAM NO BRASIL.....	22
2.3 O RIO MEIA PONTE E OS IMPACTOS SOFRIDOS AO LONGO DOS ANOS.....	24
2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS HIDROLÓGICOS	31
2.4.1 Período de retorno e risco hidrológico	33
2.4.2 Testes de hipóteses	33
2.4.3 Estimativa de Parâmetros	40
2.4.4 Estimativa dos Quantis.....	42
2.4.5 Tipos de análise de frequência hidrológica	43
2.5 O USO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS EM ESTUDOS DE SECAS	46
2.5.1 Os modelos hidrológicos nos estudos de vazões mínimas	48
2.5.2 Modelo hidrológico HYMOD	50
2.6 AVALIAÇÃO DAS SECAS COM ÍNDICES.....	53
2.6.1 Índice de seca padronizado (SPI).....	57
2.6.2 Índice de fluxo padronizado (SSI).....	60
2.6.3 Índice padronizado de evapotranspiração e precipitação (SPEI).....	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA EM ESTUDO	62
3.1.1 Localização da bacia em estudo	63
3.1.2 Caracterização climática	64
3.1.3 Biomas	66
3.1.4 Hidrogeologia e relevo	68
3.1.5 Uso e ocupação do solo.....	70
3.2 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA	72
3.3 ANÁLISE DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS	72
3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS HIDROLÓGICOS	76
3.4.1 Análises estatísticas às vazões mínimas	76
3.4.2 Análises estatísticas às precipitações.....	78
3.5. O MODELO HIDROLÓGICO APLICADO.....	80
3.6. OS ÍNDICES DE SECA APLICADOS.....	82
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1 ANÁLISE DO USO DO SOLO / ÁGUA.....	83
4.2 ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES E DO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA	89
4.2.1 Análises estatísticas aos dados de precipitação	89
4.2.2 Análise dos dados climatológicos	108
4.3 ANÁLISE DAS VAZÕES MÍNIMAS	111
4.3.1 Análises estatísticas das vazões.....	119
4.3.2 Análises das vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{95}	131
4.3.3 Análise das demandas hídricas.....	136
4.4 RESULTADOS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA	138
4.5 AVALIAÇÃO DAS SECAS.....	143
5 CONCLUSÕES.....	151
5.1 LACUNAS PARA ESTUDOS FUTUROS	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
APÊNDICE A – RESULTADOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS PARA AVALIAÇÃO DAS SECAS	167

1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é um tema explorado mundialmente, pois as mudanças climáticas, as ações antrópicas e os conflitos pelos usos da água estão alterando o regime dos cursos d'água em todo o mundo (CPRM, 2014).

Para melhor entendimento, uma seca é definida como uma deficiência de precipitação ao longo de um período de tempo prolongado, resultando em escassez hídrica. A seca hidrológica é definida como um período de deficit nos recursos hídricos. Sendo que esse termo não deve ser confundido com o período de baixo fluxo do ciclo anual de vazão, mas ser entendido como um fenômeno climático extremo. E a escassez hídrica é a falta de água para atender os diversos usos em um período de tempo. Em hidrologia esse termo é usado para explicar um período prolongado de seca ou de baixa pluviosidade (Agência Nacional de Águas, 2017; Eslamian; Eslamian, 2017).

A seca em si não é um desastre, mas se tornará dependendo do seu impacto sobre a população local, pois compromete o abastecimento de água doméstico e industrial, a dessedentação animal, a irrigação de culturas agrícolas e pode acarretar prejuízos socioeconômicos e ambientais. Todas as secas se originam de uma deficiência de precipitação, mas a magnitude dos impactos associados a esses tipos de seca, como a seca socioeconômica e política, é o resultado de práticas e políticas de gestão da água e da terra. E as crises hídricas, que vão desde os impactos da seca nas terras agrícolas mais produtivas até o acesso à água potável segura, representam as mais significativas ameaças que o planeta enfrentará nas próximas décadas. E conforme observado pela Convenção das Nações Unidas para Combater Desertificação, as demandas agrícolas, a degradação da terra e as secas estão contribuindo para uma crise global de água (Seiler; Hayes; Bressan, 2002; Zeng *et al.*, 2008; Mishra; Singh, 2010; Blain, 2014; Wilhite; Pulwart, 2018).

A seca é melhor caracterizada por múltiplas alterações climatológicas e parâmetros hidrológicos, afetando o ciclo global da água e com o potencial de alterar a disponibilidade de água para a produção de alimentos, energia, abastecimento e o meio ambiente. Por isso a avaliação das secas é importante, sendo necessária uma compreensão histórica das secas na região, conhecer parâmetros hidrológicos e fatores climatológicos das áreas em estudo. Para caracterizar melhor as secas, desenvolvendo modelos para investigar diferentes propriedades da seca e amenizar os seus impactos. E a motivação

para a discussão atual e mais pesquisas sobre esse tema, se deve a cenários de seca global durante os últimos anos, pois a escassez de água em grandes regiões metropolitanas se tornará mais frequente à medida que as mudanças climáticas impactarem os níveis históricos de precipitação e a população urbana crescer (Mishra; Singh, 2010; Gesualdo *et al.*, 2019; Pincetl *et al.*, 2019).

Portanto, as demandas por dados e informações sobre vazões mínimas são crescentes e urgentes em todo o mundo, justificando um monitoramento contínuo, pois sem o levantamento dos dados hidrológicos não se pode realizar os estudos necessários para reconhecimento e avaliação dos eventos críticos. E para que os pesquisadores e os tomadores de decisão tenham instrumentos para gerenciar situações de escassez de água e possam fazer prognósticos da situação futura. Pois a ocorrência de eventos extremos como as secas criam desafios e geram conflitos, degradando a vida das populações (Mishra; Singh, 2010; CPRM, 2017, Ortega-Gómez; Pérez-Martín; Estrela, 2018; Ndlovu; Demlie, 2020).

Nesse contexto, estudos como este mostrando o comportamento dos recursos hídricos e avaliação das secas de uma região se tornam importantes, visando subsidiar a gestão e o aproveitamento racional dos recursos hídricos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o monitoramento hidrológico nas bacias hidrográficas realizado pelo Serviço Geológico do Brasil, desde a década de 1970, pode-se perceber que os níveis dos rios nas épocas de estiagem sofreram uma redução ao longo dos anos, assim como mostram estudos de vários mananciais em todo o mundo (National Science Foundation, 2009; Croker *et al.*, 2022).

Segundo dados do MapBiomas (2023a), em 30 anos o país perdeu 1,5 milhão de hectares de superfície de água. Em 2022 houve uma recuperação, mas a série histórica mostra uma tendência predominante de redução da superfície de água no Brasil. E todos os anos mais secos da série histórica do MapBiomas, que iniciou no ano de 1985, ocorreram no intervalo entre 2013 e 2021. Englobando os 10 anos com menor superfície de água e tornando esse período o mais crítico da série histórica.

Nos últimos dez anos os níveis mínimos ultrapassaram os valores históricos em vários locais monitorados pelo Serviço Geológico do Brasil, pertencentes a Rede Hidrometeorológica Nacional, gerando vazões mínimas históricas, ou seja, apresentando

os menores valores registrados. E durante as análises das séries de vazões mínimas na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte pode-se perceber uma queda brusca entre os anos de 2015 a 2021, sendo necessário pesquisar as causas desse fenômeno.

A diminuição nos volumes de precipitação e quantidade de água em rios e reservatórios, além de comprometer o abastecimento público e a todos os usos, causa problemas na qualidade dessas águas.

Portanto, esse estudo procurou avaliar as secas na Bacia do Rio Meia Ponte, realizando:

- Estudos sobre os impactos das mudanças climáticas e alterações antrópicas, e as principais secas severas ocorridas no Brasil;
- Um histórico da ocorrência das secas na Bacia do Rio Meia Ponte;
- Análise do uso solo e da água, mostrando como foi o crescimento da Bacia do Rio Meia Ponte. Com uma evolução das alterações no uso solo ao longo do tempo;
- Estudo das chuvas na bacia, mostrando as mudanças ao longo do tempo, com análises estatísticas;
- Análise nas vazões mínimas na bacia, mostrando as influências: pelo regime de chuvas, pelos usos do solo e da água, com o aumento da urbanização (em torno de Goiânia), da industrialização e retiradas para a agricultura irrigada. Além de análises estatísticas.
- Simulação de vazões com modelo hidrológico, para fornecer uma estimativa da vazão na bacia do Rio Meia Ponte, nos últimos 20 anos.
- Avaliação das secas, utilizando índices de seca.

1.2 OBJETIVO

Verificar a influência do uso do solo, dos usos da água e das mudanças climáticas, com alterações da precipitação nas vazões mínimas, ao longo do tempo, e fazer uma avaliação das secas, na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES ANTRÓPICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS

Muitos estudos mostram que as vazões dos rios estão diminuindo em todo o mundo. E em algumas das regiões mais populosas do mundo os rios estão perdendo água. Esses estudos sugerem que tais fluxos reduzidos estão associados às mudanças climáticas e podem ameaçar o futuro abastecimento de alimentos e água (National Science Foundation, 2009).

Os eventos climáticos extremos, como falta de chuva e ondas de calor implacáveis, estão secando rios nos Estados Unidos, Europa, Ásia e Oriente Médio. Muitos rios estão encolhendo em comprimento e largura. A crise climática causada pelo homem está alimentando esses eventos climáticos extremos, impactando não apenas os próprios rios, mas também as pessoas que dependem deles para diversos fins. E as secas globais estão transformando as hidrovias em pó (Croker *et al.*, 2022).

As mudanças climáticas têm causado secas com maior frequência e gravidade, com alterações nos padrões de precipitação e níveis mais baixos em rios, pois esses padrões dependem de fatores geográficos, climáticos e antropogênicos. Essas mudanças reduzem a água disponível para o abastecimento, para diluir os poluentes e sobrecarrega os ecossistemas (National Science Foundation, 2009; Gusyev *et al.*, 2016, Nazarenko *et al.*, 2022).

Enquanto as inundações são imediatas e perceptíveis, as secas são fenômenos de evolução lenta, mas que podem colaborar com a escassez hídrica, gerando dificuldades no acesso à água para o abastecimento público e os demais usos. Ocorrendo mais conflitos pelo uso da água e tornando mais graves as pressões sobre os recursos hídricos, intensificando a pobreza e causando problemas sociais e econômicos (Gusyev *et al.*, 2016; Pereira, 2022).

Nesse contexto, os conflitos pelos usos da água tendem a se agravar. Principalmente os usos considerados prioritários, demandando uma maior gestão e necessitando-se de pensar nonexo WEF (Water-Energy-Food ou Água-Energia-Alimento). Ou seja, um equilíbrio entre a disponibilidade de água para os usos prioritários: abastecimento humano e dessedentação de animais, produção de alimentos e energia elétrica, como uma saída para a resolução desses problemas.

Alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, aprovada pela Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU), atua diretamente com o saneamento e potabilidade da água, propondo seis metas para o seu atendimento. Pois considera que o consumismo desenfreado e as mudanças climáticas são alguns dos fatores para a escassez da água no mundo. E a crise hídrica está afetando diretamente diversos serviços na sociedade. Sendo necessário o atendimento aos ODS, além de mudanças comportamentais, para se atingir tais objetivos (Cadore; Tochetto, 2021).

Muitos estudos consideram que as alterações climáticas influenciaram a procura por recursos naturais, como água, energia e alimentos. Destacando que a gestão dos recursos naturais de uma região, de modo a equilibrar o nexos WEF em meio as alterações climáticas, e o crescimento de determinado território, está entre os maiores desafios do século XXI. Esses resultados fornecem informações e permitem o conhecimento científico da comunidade e aos tomadores de decisão para desenvolver uma visão integrada e ampla deste tópico (Herrera-Franco *et al.*, 2023).

A produção de alimentos no Brasil é afetada pelas mudanças climáticas, mas também causa tais mudanças, sendo um dos maiores emissores de gases de efeito estufa no mundo, sendo boa parte proveniente da agropecuária, desde mudanças no uso da terra para lavouras e pastagem até suas cadeias de produção bovina. Isto coloca a produção de alimentos brasileira no centro da questão climática nacional e global, devendo-se repensar questões em atenção às propostas da Agenda 2030 (Domene *et al.*, 2023).

Considerando que água, energia e alimento são elementos básicos para a sobrevivência das populações, a falta de gerenciamento integrado entre esses setores, põe em risco a segurança de gerações atuais e futuras, considerado o aumento da população urbana. E estudos visualizam caminhos sustentáveis para auxiliar a gestão dos recursos hídricos no equilíbrio dos usos, mostrando opções de adaptação da segurança hídrica com a segurança energética e a alimentar. Na segurança hídrica a adoção da outorga baseada na análise da disponibilidade hídrica e demanda mensais é uma das ações, favorecendo o uso mais intensivo nos períodos de maior disponibilidade de água e com maior restrição na estação de seca. Para a melhoria da qualidade das águas, ações como a solicitação de outorga para lançamento de efluentes domésticos e implantação de estações de tratamentos de esgoto (Goiás, 2023b).

Na segurança energética a recomendação é a busca de fontes alternativas, melhorias na eficiência das fontes energéticas e o incentivo à geração de energia descentralizada,

podendo beneficiar a segurança hídrica na disponibilidade do recurso para vários usuários, como pela agropecuária. Em opções de adaptação da segurança alimentar, o incentivo à bioenergia, o uso da biomassa residual como fonte alternativa de energia usando resíduos agrícolas, agroindustriais e sólidos urbanos. E a implantação de parques fluviais, com arborização e pavimentação permeável, buscando integrar os elementos naturais e o ambiente construído (Coutinho *et al.*, 2020; Gomes; Veról, 2021; Goiás, 2023b). Também a produção energética com regularização de níveis pode contribuir com o aumento dos níveis dos mananciais nos períodos de estiagem.

E onde a agropecuária é expressiva, como na Bacia do Rio Meia Ponte, o poder público deve buscar soluções para a recuperação e a manutenção de ambientes naturais por meio práticas conservacionistas no uso e manejo dos solos. Maior eficiência agrícola, com melhores práticas na irrigação e produção em áreas sem desmatamento. Também a conservação das matas ciliares, evitando a erosão dos solos e o assoreamento dos corpos d'água. E para agricultura sustentável, desenvolvendo sistemas de manejo agrícolas adaptados às mudanças do clima e melhorias na infraestrutura para incentivo à agricultura urbana e familiar. Nesse contexto, os recursos hídricos possuem grande papel na dinâmica socioeconômica e ambiental (Coutinho *et al.*, 2020; Gomes; Veról, 2021; Santos; Martins, 2022; Goiás, 2023b).

Também o fortalecimento de capacidades e da articulação político-institucional para promover ações de uso mais eficiente da água, como o reuso nos setores urbanos, industriais e agrícolas. E incentivar medidas para utilização racional da água na indústria, evitar a sobrecarga de pequenos rios, tanto como fonte de captação como ponto de lançamento de efluentes, estimular processos produtivos mais sustentáveis, com racionalização do uso de insumos, redução de desperdícios e reciclagem ou reuso de resíduos, trazendo impactos socioambientais positivos (Coutinho *et al.*, 2020; Goiás, 2023b).

Tais ações são necessárias e possíveis de serem adotadas na Bacia do Rio Meia Ponte. Faltando a sua implementação, para prevenir que a escassez hídrica venha a ocorrer novamente, como tem acontecido nas últimas décadas. Sendo tais ocorrências apresentadas em um histórico da Bacia do Rio Meia Ponte, nos próximos itens.

2.2 EXEMPLOS DE ESTIAGENS SEVERAS QUE OCORRERAM NO BRASIL

Nas últimas décadas ocorreram os anos mais secos das séries históricas em todo o Brasil (MapBiomias, 2023a). Mas fazendo um histórico com os dez maiores períodos de seca no Brasil, segundo reportagem da Revista Super Interessante (2014), pode-se verificar períodos mais antigos com secas severas, principalmente nos estados da região nordeste:

- Entre os anos de 1723 e 1727 foi registrada uma das primeiras grandes secas que atingiu a região nordeste, onde ficava a Capitania de Pernambuco.

- Entre 1776 e 1778 foi uma seca combinada com um surto da doença varíola na região nordeste, ocorrendo altíssima taxa de mortalidade de pessoas e animais, principalmente o gado.

- Entre 1877 e 1879 uma seca atingiu todo o nordeste, principalmente o Estado do Ceará, causando muitas mortes e uma grande migração para a região Amazônica e outros estados brasileiros.

- Entre 1919 e 1921 uma seca muito grave atingiu principalmente o sertão de Pernambuco, ocorrendo novamente êxodo rural do Nordeste para as outras regiões.

- Entre 1934 e 1936 foi uma das maiores secas registradas no Brasil, não ficando restrito ao Nordeste, mas também atingindo os estados de Minas Gerais e São Paulo.

- Em 1963 a seca foi gravíssima, batendo recordes em vários estados, ocorrendo nas regiões nordeste e sudeste, estado do Paraná e Distrito Federal. Se estendeu até a Amazônia, com falta de chuvas e uma onda de calor muito forte.

- Entre 1979 e 1985 ocorreu uma das secas mais prolongadas da história do Nordeste, durando 7 anos, com destaque para o ano de 1981. A estiagem deixou um rastro de miséria e fome, ocorrendo lavouras perdidas, animais mortos, saques a feiras e armazéns. Resultando na morte de 3.5 milhões de pessoas, a maioria crianças sofrendo de desnutrição.

- Na década de 1990, entre 1997 e 1999, a seca foi severa, com efeitos do fenômeno El Niño, que causou o aumento das temperaturas das águas e várias consequências para o clima. E agravamento das secas no Nordeste, com 5 milhões de pessoas foram afetadas, saques a depósitos de comida devido às mortes de animais e lavouras perdidas. A seca foi tão grave que Recife passou a receber água encanada apenas uma vez por semana.

- Em 2001 a seca foi um prolongamento da seca da década de 90, que teve uma trégua em 2000. A falta de chuvas em todo o Brasil contribuiu para a pior crise energética do país.

- Nos anos de 2007 e 2008 ocorreu uma seca histórica no norte de Minas Gerais. Com poucas chuvas entre março e novembro de 2007 e abaixo da média em 2008, totalizando praticamente 15 meses de estiagem. Durante o período centenas de municípios decretaram estado de emergência. (Super Interessante, 2014).

E desde 2011 na região sudeste do Brasil, foram registradas precipitações abaixo da média histórica, conseqüentemente registrando-se vazões abaixo da média histórica. Portanto, em 2014 o Serviço Geológico do Brasil em parceria com Agência Nacional de Águas (ANA) fez um planejamento para acompanhar aquele período de estiagem e constataram a situação de escassez. Estabeleceu-se uma rotina de acompanhamento das chuvas e níveis dos rios nas áreas de atuação de Belo Horizonte e São Paulo. Intensificando as medições de vazões e registrando níveis e vazões mínimas recordes nos principais rios da região, e estabelecendo prognósticos para o período seco. Com destaque para o ano de 2017, em que as vazões medidas na estiagem foram menores do que a vazão Q₉₅, utilizada para a concessão de outorgas pela ANA nos rios de domínio federal. E as análises das precipitações entre 2014 e 2019 mostraram que os períodos mais críticos estiveram localizados entre 2014 e 2017 (CPRM, 2014, 2017, 2019).

Nos anos de 2020 e 2021 observou-se uma estiagem bastante severa na Região Hidrográfica do Paraná, onde se localiza o Rio Meia Ponte, para a qual foi declarada situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos até 30 de novembro de 2021 (resolução ANA N° 77 de 01 de junho de 2021). Essa estiagem, associada aos déficits dos anos anteriores, gerou problemas de armazenamento de energia no subsistema Sudeste/Centro-Oeste que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN), devido aos baixos níveis nas bacias dos rios Grande, Paranaíba e também no Tocantins, as quais representam 80,86% da capacidade de armazenamento de energia do subsistema Sudeste/Centro-Oeste. Também se observou situação de estiagem severa na Bacia do Alto Paraguai, sendo incluídas no acompanhamento da estiagem as bacias do Alto Paraguai e do Tocantins. Os resultados de precipitação para 2021 de todo o ano hidrológico não só ficou abaixo da média de vinte anos para todas essas bacias, mas é a mais baixa de toda a série (Mello, 2021).

Em 2023 houve uma seca histórica na Região Amazônica, provavelmente devido às mudanças climáticas e ações antrópicas, reduzindo o volume dos rios para níveis mínimos em mais de 120 anos de medição. Com alguns trechos secando por completo e afetando rios tributários, o que impactou milhões de pessoas que vivem na região. Os cientistas identificaram que o aquecimento global tornou a seca que atingiu a região 30 vezes mais provável e que o aumento das temperaturas foi determinante para a intensidade e extensão do episódio. Em janeiro de 2024, mesmo após o início da estação chuvosa, a seca continuou em partes da bacia do Rio Amazonas (Brasil, 2024).

Esse histórico mostra o quanto os períodos de estiagem têm preocupado a população brasileira, afetando todas as regiões, que sofrem com suas consequências.

2.3 O RIO MEIA PONTE E OS IMPACTOS SOFRIDOS AO LONGO DOS ANOS

Desde sua nascente localizada na Serra dos Brandões, município de Itauçu no estado de Goiás, o Rio Meia Ponte percorre vários espaços urbanos inclusive de Goiânia, capital do estado de Goiás, até desaguar no Rio Paranaíba. No perímetro urbano de Goiânia, o rio corta mais de 30 bairros, em um percurso de 30 km, abrangendo seis regiões administrativas. No trecho dentro da capital, o rio sofre os maiores e mais intensos processos de degradação (Tavares *et al.*, 2023).

Mas fazendo um histórico, nos primeiros projetos para a construção de Goiânia, o fator referente à riqueza de recursos hídricos fortalecia a ideia de um local propício para a instalação da nova capital do estado. Logo, o Rio Meia Ponte era um item importante, reforçando a ideia de que estas terras foram escolhidas para edificar a capital, devido a rica hidrografia que apresentava, com previsão que o rio fosse sua principal fonte de abastecimento e fornecimento de energia elétrica (Nucada; Barrera, 2008; Ribeiro; Oliveira; Vila Verde, 2021; Tavares *et al.*, 2023).

A década de 1950 marca o crescimento urbano de Goiânia, caracterizado pela especulação imobiliária. E o Rio Meia Ponte, que inicialmente seria utilizado como principal fonte de abastecimento da cidade, de energia elétrica e de um local de lazer para os goianienses, segundo o projeto inicial, tornou-se bastante poluído nas décadas seguintes por começar a receber o esgoto sanitário urbano. E grande parte de suas margens foram ocupadas irregularmente, causando desmatamentos, erosões dos vales, assoreamento e poluição das águas, gerando consequências quase que irreversíveis. Nas décadas seguintes a situação foi se agravando, surgindo mais conflitos pelos usos na bacia, principalmente nas épocas

de estiagem, quando os níveis dos rios reduzem a valores mínimos, comprometendo o abastecimento das cidades, inclusive da capital Goiânia (Ribeiro; Oliveira; Vila Verde, 2021; Tavares *et al.*, 2023).

Em 1997 o Comitê da Bacia do Rio Meia Ponte foi instituído. Com atribuições deliberativas e consultivas, de nível regional e estratégico, do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, promoção do debate das questões relacionadas a Recursos Hídricos com os demais Comitês, de aprovar e acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da Bacia e propor a criação das Agências de Água da Bacia (CBH, 2023).

Na década de 2000 estudos e noticiários jornalísticos já mostravam a situação degradante do Rio Meia Ponte como um espaço poluído e de despejo. Apesar de já terem sido implantadas estações de tratamento de esgoto em Goiânia, não houve ações suficientes pelo poder público em relação à recuperação do rio. Apenas alguns projetos, como o de recuperação do vale do córrego Macambira-Anicuns, afluente do Rio Meia Ponte, iniciado em 2004 pela prefeitura de Goiânia, visando a recuperação do córrego (Ribeiro; Oliveira; Vila Verde, 2021).

Em 2012 foi apresentado o Programa Institucional Meia Ponte, coordenado pela Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, que pretendeu desenvolver um diagnóstico sistêmico do rio e propor soluções para sua recuperação e preservação, com a formulação de diretrizes para um futuro plano diretor. Pois esses pesquisadores se mostravam preocupados com a situação do rio, que na época recebeu o título de mais importante do estado, mas ocupava o posto de sétimo rio mais poluído do Brasil. Considerando que além da poluição, o Rio Meia Ponte já vinha apresentando redução de sua vazão desde a década de 1990, devido à ausência de mata ciliar e de galeria em muitos trechos, lançamento clandestino de esgoto, acúmulo de entulhos e lixo, focos de erosão, assoreamento e ocupação irregular das faixas de Área de Preservação Permanente (APP) (Jornal UFG, 2012).

Mas foi em outubro de 2017, a época que o rio esteve em uma das mais graves crises hídricas da história de Goiânia. O jornal O POPULAR produziu uma série de reportagens com o título “Especial Meia Ponte: um rio sedento”, mostrando os vários problemas que o rio vinha sofrendo e concluiu com o que seria um apelo do Rio, “Ao longo do curso, o rio Meia Ponte e seus afluentes lidam com a retirada de água, poluição, desmatamento, e outros fatores que atrapalham a bacia. Por 471 quilômetros, o rio luta para não morrer”.

A Figura 1 mostra a situação encontrada pela equipe do Jornal O Popular em setembro de 2017, quando o Rio Meia Ponte secou, logo abaixo do ponto de captação para o abastecimento de Goiânia (O Popular, 2017).

Figura 1 - Situação do Rio Meia Ponte no mês de setembro de 2017



Fonte: Jornal O Popular (2017) - <https://opopular.com.br/especial-meia-ponte-um-rio-sedento-1.1364541>. Foto de Domicio Gomes.

Diante desse cenário, nos anos seguintes foram iniciadas ações envolvendo vários órgãos do Estado de Goiás e a Universidade Federal de Goiás, na tentativa de reverter a grave situação do Rio Meia Ponte, bem como das demais bacias do Estado.

Foi iniciado em novembro de 2017 um projeto de recuperação do rio Meia Ponte viabilizado pela SANEAGO, por meio de edital do Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA) para seleção de propostas voltadas à recuperação de vegetação nativa de áreas de preservação permanente em bacias hidrográficas degradadas, batizado de Recuperação Florestal em Áreas de Nascentes e/ou que margeiam os Corpos d'água na Bacia Hidrográfica de Contribuição ao Abastecimento Público de Goiânia-GO. O objetivo do plano foi proteger e recuperar 84 mananciais no estado (A Redação, 2017; Ribeiro; Oliveira; Vila Verde, 2021).

Em 2018 foi elaborado um estudo para o Plano de Bacias dos Afluentes do Paranaíba do Estado de Goiás, pela Equipe técnica da Fundação de Apoio à Pesquisa da Universidade Federal de Goiás (FUNAPE/UFG), contratado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Cidades, Infraestrutura e Assuntos Metropolitanos (SECIMA). Resultando no “Produto 1 - Bases Metodológicas”, tendo como objeto a

confeção do Plano de mobilização e Participação Social inerente ao processo de elaboração dos “Planos de Recursos Hídricos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Goiás, afluentes ao Rio Paranaíba”. Tais planos pretendiam servir como instrumento de gestão integrada dos recursos hídricos nas bacias, apresentando diretrizes para o uso, conservação e gestão dos recursos hídricos da Bacia do Rio Meia Ponte e suas bacias afluentes (Goiás, 2018).

E desde 2017 todos os rios pertencentes à bacia do Rio Meia Ponte apresentaram níveis baixos, tendo maior controle das captações por parte da SEMAD, tanto para qualidade quanto para a disponibilidade de água. Mas em 2019 novamente o Rio Meia Ponte esteve em níveis críticos, com várias reportagens de noticiários e jornais mostrando a situação do rio. Em abril 2019 o Rio Meia Ponte esteve sob alerta hídrico, decretado pelo governador Ronaldo Caiado, sendo apresentado o Plano Estadual de Gestão Hídrica, com objetivo de dar mecanismos para gerir a crise hídrica e evitar o desabastecimento durante o período de estiagem. Mas apesar da série de ações executadas pelos órgãos SEMAD e SANEAGO, de julho até outubro de 2019 o rio saiu do nível de alerta e atingiu nível crítico 4, o mais baixo. Considerando que os níveis de segurança para o abastecimento público são seis: atenção, alerta e níveis críticos de 1 a 4 (O Popular, 2019; Jornal Daqui, 2023a; Goiás, 2024).

Nos anos seguintes não foi difícil encontrar reportagens sobre a situação crítica do Rio Meia Ponte em época de estiagem, que acontece entre os meses de setembro e outubro. Pois o Rio Meia Ponte é o principal fornecedor de água para a Região Metropolitana de Goiânia. Em 2020 a bacia tinha 740 produtores cadastrados e 236 irrigantes, além de outros usuários sem autorização, apesar da fiscalização. Em junho de 2023 possuía mais de 400 pedidos de outorga aguardando, para retirada de água na porção do Alto Meia Ponte. Região localizada a montante da principal captação para abastecimento público, onde abriga atividades industriais, agroindustriais e pecuária. Resultando em um processo de governança das águas, não sendo possível atender a todas as solicitações, pois o valor total das retiradas seria maior que o permitido. Por isso houve restrição de outorga desde então, em todos os períodos de estiagem, devido à situação de escassez hídrica do Rio Meia Ponte. Sendo que a legislação prevê prioridade para o abastecimento público e dessedentação de animais (Jornal Daqui, 2023a).

Entre os anos de 2018 a 2021, os Conselhos Estaduais de Meio ambiente e de Recursos Hídricos de Goiás e o Comitê da Bacia do Rio Meia realizaram reuniões para

enfrentamento da falta de água, com a participação da Federação da Agricultura do Estado de Goiás (FAEG), para decisões sobre início de racionamento de água na capital e ações para contribuir com a segurança hídrica da bacia. E reunindo com os usuários de água da bacia e articulação para campanha sobre uso racional da água nas mídias sociais. Em agosto 2023, diante de baixos níveis do rio Meia Ponte, os produtores rurais, junto ao Sistema FAEG/SENAR/IFAG desenvolveram ações de conscientização para o uso racional da água e do manejo da irrigação, disponibilizando cursos de agricultura irrigada (Federação da Agricultura do Estado de Goiás, 2018, 2023).

E em agosto de 2019 o Centro de Informações Meteorológicas e Hidrológicas de Goiás (CIMEHGO) da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), publicou informações sobre a piora na situação da bacia do Rio Meia Ponte nos últimos anos, sendo agravada pelas questões climáticas, a redução das precipitações e nas vazões dos seus mananciais. E mostrou algumas ações que estavam sendo realizadas pelo Sistema de Gestão de Recursos Hídricos, para o enfrentamento dos riscos de emergência hídrica na bacia. De acordo com o Decreto Estadual n.º 9.670/2020, que declarou situação de risco de emergência hídrica por 210 dias nas bacias hidrográficas do Alto Rio Meia Ponte e do Ribeirão Piancó e definiu as ações para garantir o uso prioritário da água; e a Deliberação 15/2020 CBH Meia Ponte, que definiu os níveis de criticidade e deu diretrizes para enfrentamento à escassez para o ano de 2020 (Goiás, 2019).

Em 2020 a SANEAGO apresentou à Agência de Regulação de Goiânia um plano de racionamento para 2022, como parte integrante do Plano de Atendimento e Operação em Situações Críticas (PAOSC) de Goiânia, com última revisão em 2021. O trabalho foi composto por um planejamento de ações de contingência para a operação do Sistema de Abastecimento de Água de Goiânia e regiões conurbadas no período de estiagem de 2022, com enfoque no Sistema Rio Meia Ponte, caso se confirmasse o risco de redução drástica na vazão deste manancial abastecedor que fosse capaz de afetar o fornecimento de água à população (Goiânia, 2022).

Em setembro de 2020 a Equipe técnica da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG) apresentou um Diagnóstico e Prognóstico dos Recursos Hídricos do Rio Meia Ponte para representantes da SANEAGO, FIEG e sociedade civil organizada, realizados em conjunto com a SEMAD, sob a coordenação do Professor Klebber Formiga. Esses estudos foram elaborados para o período de 2020 a 2040, sendo parte dos Planos de Bacias dos Afluentes do Paranaíba do Estado de Goiás

(PBAP-GO), possibilitando identificar para cada município um diagnóstico regional, apontando os principais problemas da região, as metas e ações prioritárias que ocorrerão na área municipal. Esses planos resumiram os aspectos avaliados, resultando em sete produtos contendo: diagnóstico e prognóstico de recursos hídricos para a região, diretrizes, metas e ações relacionadas aos recursos hídricos para as bacias inseridas no município. Os produtos finais foram entregues nos anos de 2022 e 2023 (Jornal UFG, 2020; CBH, 2023; Goiânia, 2022).

Em 2021 foi aprovado o Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, por meio da Deliberação nº 018/2021, pelo comitê de bacia, estabelecendo metas e soluções de curto, médio e longo prazos para os problemas da bacia relacionados à água (CBH, 2023).

E para atender à demanda hídrica no Alto Meia Ponte, o Comitê de Bacia Hidrográfica do Meia Ponte (CBH-MP) instituiu um processo de alocação negociada desde 2022, com apoio da SEMAD, para permitir a entrada de novos outorgantes no sistema, onde o mecanismo consiste em convocar os usuários do manancial e verificar a possibilidade de cessão do recurso. Essa alocação negociada é conduzida por meio de informações técnicas sobre a disponibilidade de água do rio. A SEMAD dividiu a bacia em áreas para controle, com monitoramento diário da vazão do Rio Meia Ponte, fazendo balanço hídrico em cada uma, para definir em quais existe disponibilidade hídrica suficiente para a liberação de novos pedidos de uso. Nesse sentido, a SEMAD e o comitê envolvem diversos colegiados e interessados, como os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos e de Meio Ambiente, usuários da água, instituições de governo, representações da sociedade civil e a população em geral, objetivando a conservação ambiental e privilegiando os múltiplos usos da água (Goiânia, 2022; CBH, 2023; Jornal Daqui, 2023a; Goiás, 2023c; Goiás, 2024).

Algumas ações foram feitas, a longo prazo, visando evitar tais problemas de escassez na Bacia do Rio Meia Ponte. A SEMAD desenvolveu um projeto-piloto de conservação e uso do solo no município de Ouro Verde, localizado na Bacia do rio Meia Ponte, com objetivo de aumentar a disponibilidade hídrica na região, diminuindo o transporte de sedimentos e aumentando a infiltração de água no solo (Jornal Daqui, 2023a),

Segundo dados da SANEAGO em 2023, o Sistema Mauro Borges de abastecimento pelo Ribeirão João Leite aumentou para dois terços da produção da água distribuída em Goiânia e na Região Metropolitana, com o objetivo de reduzir a área de influência do Sistema Meia Ponte. E a SANEAGO realizou um estudo hidrológico para escolha de um novo manancial para suplementar o abastecimento público da região metropolitana, sendo

as opções em um raio de 60 km, como os rios Inhumas, Das Caldas e Dos bois, levando em consideração o nível de preservação, a distância e possibilidades de barramento (Goiás, 2021; Jornal Daqui, 2023b).

Em março de 2023 foi realizada a 1ª Expedição Rio Meia Ponte, de iniciativa da Câmara Municipal de Goiânia, com apoio das instituições: Universidade Federal de Goiás (UFG), Instituto Federal de Goiás (IFG), SANEAGO, Centro de Zoonoses, Batalhão Ambiental e do Corpo de Bombeiros, e o objetivo de percorrer o rio Meia Ponte para verificar seus problemas e encontrar possíveis soluções de recuperação e conservação do manancial. Na segunda etapa da Expedição, em setembro de 2023, buscou avaliar a situação do rio na época de seca, quando foram recolhidas 12 toneladas de lixo. Um diagnóstico da situação do rio e seus afluentes foi elaborado, sendo realizadas ações de educação ambiental e limpeza do manancial. E resultando no documento “Carta das Águas”, contendo diferentes análises sobre o Rio Meia Ponte e revelando o altíssimo nível de poluição no manancial. E mostrando uma situação mais grave do que os próprios estudiosos haviam pensado, além de articular possíveis soluções entre diferentes setores que lidam com o rio. Esses resultados visam a construção de um plano de Educação Ambiental, viabilização de fontes de financiamento para recuperação do rio, entre outras ações de curto, médio e a longo prazo (Jornal Opção, 2023; Jornal UFG, 2023).

Em março de 2024 foi realizada a 2ª Expedição Rio Meia Ponte, retornando ao rio para analisar as condições do Meia Ponte e para avaliar se houve melhora em relação ao ano passado. Duas estações ambientais permanecerão instaladas para receber alunos da rede pública de ensino e moradores da região. As análises de campo e laboratoriais darão origem a um novo documento, que servirá de comparativo com estudos realizados em 2023 (Câmara Municipal de Goiânia, 2024; Jornal Opção, 2024).

E no dia 14 de maio de 2024 foi promovido o evento “Oficina de Avaliação da Implementação do Plano de Bacia do Rio Meia Ponte”, pela SEMAD, em Goiânia, para avaliação das ações do Plano de Bacia pelo Comitê da bacia, membros do Poder Público Municipal, da Sociedade Civil e dos Usuários de Água. Este evento contou com contribuições dos setores para gestão dos recursos hídricos de Goiás (CBH, 2024).

Após esse histórico, percebe-se que o Rio Meia Ponte é apresentado pelos meios de comunicação de forma negativa, sempre ligado aos problemas ambientais ou sociais. Já chamado de “o rio do esgoto”, sendo sua recuperação algo utópico. Fatos reais tristes, pois para a população goiana que depende dele para se abastecer, e vive desde sua infância

às margens desse rio, ele é considerando o mais importante. E o Rio Meia Ponte tem sua vida futura comprometida, caso projetos que visem demonstrar seu valor não sejam elaborados e implementados (Ribeiro; Oliveira; Vila Verde, 2021; Tavares *et al.*, 2023).

Nos próximos itens serão mostrados os referenciais teóricos, para melhor entendimento sobre as análises realizadas neste estudo.

2.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS HIDROLÓGICOS

Os fenômenos climatológicos são caracterizados por uma grande variabilidade, aleatoriedade e incerteza quanto à sua magnitude e ocorrência. Logo, a utilização de análises estatísticas é essencial para melhor compreensão desses fenômenos naturais. E nas análises de eventos extremos, a metodologia de “análise de frequências” é importante para estimar as probabilidades de ocorrência (WMO, 2009).

A ocorrência de eventos extremos não pode ser prevista com informações determinísticas, mas em uma abordagem probabilística, onde é analisada a frequência que eventos de diferentes magnitudes, para incorporar os efeitos de tais fenômenos em decisões futuras. Como em toda análise estatística existem fontes de incerteza associadas, na análise de frequência tais fontes incluem: a representatividade dos dados, a seleção da distribuição de probabilidade e a estimação dos parâmetros (Reis, 2017).

Os sistemas hidrológicos podem ser impactados por eventos extremos. A magnitude de um evento extremo é inversamente relacionada à sua frequência de ocorrência, uma vez que os eventos muito severos ocorrem com menor frequência do que os mais moderados. O objetivo da análise de frequência das variáveis hidrológicas é relacionar a magnitude dos eventos com sua frequência de ocorrência por meio de uma distribuição de probabilidade. Os resultados da análise de frequência são necessários para a solução de vários problemas de engenharia (Naghetini; Pinto, 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

Em hidrologia, as variáveis como precipitação e vazão têm sua variabilidade registrada por séries temporais, que reúnem os valores organizados de forma sequencial de sua ocorrência no tempo ou espaço. As séries hidrológicas podem incluir todas as observações disponíveis ou ser uma série reduzida. No caso de eventos hidrológicos extremos, como máximos e mínimos, as séries reduzidas podem ser anuais, quando os registros consecutivos são equidistantes no tempo. Os métodos estatísticos requerem que as séries hidrológicas reduzidas devem ter os atributos de independência,

estacionariedade e homogeneidade. E que se trata de uma amostra aleatória simples, extraída de uma população única, cuja função de distribuição de probabilidades não é conhecida. E devem ser representativas da variabilidade presente no fenômeno hidrológico em questão, não apresentando erros de observação, além de possuir um número suficiente de elementos que permita realizar extrapolações confiáveis. Ela é considerada não representativa, se possui uma predominância de anos secos ou úmidos. Pelas características distributivas das variáveis hidrológicas e pelo tamanho típico de suas amostras, podem ser testadas utilizando os testes não-paramétricos de hipóteses, para verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência de uma variável hidrológica. Logo, na montagem de uma série, deve-se observar que entre dois de seus pontos consecutivos haja um período suficientemente longo de recessão, de modo que os valores da série sejam independentes entre si. As séries hidrológicas podem ser estacionárias se não apresentar tendências ou ‘saltos’, ou uma periodicidade ao longo do tempo, como resultado de variações naturais do clima ou alterações antrópicas. Uma série é considerada homogênea se o padrão de variabilidade, em torno do médio, é único e idêntico, ao longo do tempo (Naghetini; Pinto, 2007).

A análise de frequência pode ser realizada de modo analítico, utilizando técnicas baseadas em fatores de frequência, ou de modo empírico, podendo-se recorrer ao posicionamento gráfico dos dados na forma de uma distribuição cumulativa de probabilidade. No caso de variáveis hidrológicas, que não se conhece a distribuição populacional, especifica-se um modelo distributivo capaz de descrever o comportamento probabilístico da variável analisada. Como existem várias distribuições teóricas, deve-se selecionar aquela que melhor representa o comportamento da variável em estudo, ou qual melhor se ajusta à distribuição empírica. Esse ajuste é analisado com base em testes de hipóteses estatísticos (Naghetini; Pinto, 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011; Reis, 2017).

Em estudos sobre secas como este, a análise de frequência hidrológica torna-se importante no estudo das chuvas e vazões mínimas, para a estimativa de valores característicos, como a vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno, vazão de referência para retiradas de água em mananciais de alguns estados.

Para melhor entendimento das análises estatísticas das chuvas e vazões, são necessários os conceitos de: período de retorno e risco hidrológico, testes de hipóteses, estimativa de parâmetros das distribuições de probabilidades e estimativa dos quantis, os quais são apresentados nos próximos itens.

2.4.1 Período de retorno e risco hidrológico

Período de retorno (T) de uma variável pode ser definido como o número de anos para que o valor dessa variável ocorra ou seja superado. Designando a probabilidade da variável aleatória X assumir um valor inferior ou igual a x, por probabilidade de não excedência, F(x) com, $F(x) = P(X \leq x)$ e designando a probabilidade de a variável aleatória X assumir um valor superior a x, por probabilidade de excedência G(x), com $G(x) = P(X > x) = 1 - P(X \leq x) = 1 - F(x)$, pode exprimir-se o período de retorno por:

$$T = 1 / G(x) = 1 / (1 - F(x)) \quad (1)$$

Sendo o risco hidrológico (R) função do período de retorno, representa a probabilidade de um valor x da variável aleatória X ser excedido em pelo menos uma vez, em n anos sucessivos, como:

$$R = n / T = 1 - (1 - 1/T)^n = 1 - (1 - G(x))^n \quad (2)$$

(Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

2.4.2 Testes de hipóteses

Quando se pretende saber se uma determinada variável aleatória segue uma distribuição teórica, utiliza-se um teste de hipóteses.

Segundo Naghetini e Pinto (2007), os testes de hipóteses são métodos da inferência estatística, que auxiliam as decisões sobre a forma ou valores de um certo parâmetro, de uma distribuição de probabilidades, da qual se conhece apenas uma amostra de observações. Com eles formula-se uma hipótese sobre o comportamento probabilístico da população. Não rejeitar ou rejeitar a hipótese dependerá do confronto entre a conjectura e a realidade física, concretizada pelas observações que compõem a amostra. A rejeição da hipótese implica na necessidade de eventual revisão, em desacordo com a realidade imposta pelos dados amostrais. A não rejeição da hipótese significa que não há elementos suficientes para descartar a premissa inicial sobre o comportamento da variável aleatória. E 'não rejeitar' não significa 'aceitar' a hipótese.

Como se trata de uma inferência a respeito de uma variável aleatória, a decisão de não rejeitar (ou de rejeitar) uma hipótese, é tomada com base na probabilidade ou nível de significância α , que é complementar à probabilidade $(1 - \alpha)$ com que um certo intervalo de confiança [I, S] contém o valor populacional de um parâmetro θ . O intervalo [I, S] estabelece os limites de variação da chamada estatística de teste, dentro dos quais a

hipótese sobre θ não pode ser rejeitada. Se os valores da estatística de teste localizarem-se fora dos limites impostos por $[I, S]$, a hipótese sobre θ deve ser rejeitada, a um nível de significância α .

Os testes de hipóteses podem ser classificados em paramétricos ou não paramétricos. Os testes não paramétricos não necessitam da especificação prévia do modelo distributivo da população, sendo formulados com base em algumas de suas características ou atributos. Os testes mais frequentes são aqueles que se referem a afirmações sobre um parâmetro populacional. Quando a hipótese, a ser testada, diz respeito à forma do modelo distributivo da população de onde a amostra foi extraída, os testes são denominados de aderência.

A aplicação de um teste de hipóteses consta das seguintes etapas:

- Formulação da hipótese a ser testada, sendo H_0 = Hipótese nula
- Formulação da hipótese alternativa, sendo H_1 contrária a H_0
- Seleção da estatística de teste a ser utilizada, de acordo com H_0 e H_1
- Especificação da distribuição de amostragem da estatística, de acordo com a hipótese nula e com a distribuição de probabilidades da população de onde as observações foram extraídas.
- Especificação da região de rejeição R , para a estatística de teste, que depende do nível de significância α .
- Utilização da estatística de teste, a partir das observações amostrais, tomando a decisão: rejeitar H_0 se a estatística está na região de rejeição ou não rejeitar H_0 se está fora da região de rejeição

Ao tomar uma destas duas decisões, pode-se cometer dois tipos de erros: de primeira espécie (quando se rejeita H_0 sendo ela verdadeira) e de segunda espécie (quando se aceita H_0 sendo ela falsa). Na prática, é razoável prescrever o nível de significância α em 0,05. Se as consequências de um tipo forem muito graves, pode-se escolher um nível de significância menor, como $\alpha=0,01$ ou $\alpha=0,001$ (Naghetini; Pinto, 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

Segundo Naghetini e Pinto (2007), em Hidrologia são aplicados os testes não paramétricos para a verificação das hipóteses fundamentais da análise de frequência de uma variável hidrológica. Para a aplicação dos métodos estatísticos a um conjunto de observações de uma variável hidrológica, é que se trata de uma amostra aleatória simples,

extraída de uma população única, cuja função de distribuição de probabilidades não é conhecida. Onde estão implícitas as hipóteses de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade:

- Teste de hipótese não-paramétrico de aleatoriedade = hipótese de aleatoriedade de uma série hidrológica, significando que as flutuações de uma variável hidrológica decorrem de causas naturais, possa ser decidida por meio do teste não-paramétrico do número de inflexões. Um número excessivamente pequeno, ou excessivamente grande, de inflexões é um indicador de não-aleatoriedade. Se uma amostra de N observações é aleatória, pode-se mostrar que o valor esperado do número de inflexões (p), é dado por:

$$E [p] = \frac{2(N-2)}{3} \quad (3)$$

Com variância que pode ser aproximada por:

$$\text{Var} [p] = \frac{16N - 29}{90} \quad (4)$$

Para $N > 30$, p segue uma distribuição Normal. Se H_0 é nula a amostra é aleatória, a estatística do teste não-paramétrico pode ser formulada como:

$$T = \frac{p - E[p]}{\sqrt{\text{Var}[p]}} \quad (5)$$

Sendo um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se $|T| > Z_{1-\alpha/2}$.

- Teste de hipótese não-paramétrico de independência = a independência significa que nenhum dado da amostra pode influenciar a ocorrência de qualquer outro dado. A dependência varia com o intervalo de tempo que separa as observações consecutivas de uma série hidrológica: forte, para vazões médias diárias, e fraca ou nenhuma, para vazões máximas ou mínimas anuais. A rejeição ou não-rejeição da hipótese de independência de uma série hidrológica é decidida por meio do teste não paramétrico proposto por Wald e Wolfowitz (1943):

Dada uma amostra $\{X_1, \dots, X_N\}$, construindo a seqüência $\{X'_1, \dots, X'_N\}$, com cada X'_i sendo a diferença entre X_i e a média aritmética, a estatística do teste é dada por:

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i X'_{i+1} + X'_1 X'_N \quad (6)$$

Sob a hipótese nula, os dados são independentes, prova-se que a variável segue uma distribuição normal com média igual a

$$E[R] = -s_2 / N - 1 \quad (7)$$

E variância igual a

$$\text{Var}[R] = \frac{s_2^2 - s_4}{N-1} + \frac{s_2^2 - 2s_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{s_2^2}{(N-1)^2} \quad (8)$$

Onde r = ordem dos momentos amostrais em relação à origem, $S_r = Nm_r$ e

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i)^r}{N}. \quad (9)$$

A estatística do teste pode ser formulada, seguindo uma distribuição Normal padrão:

$$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{\text{Var}[R]}} \quad (10)$$

Sendo um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se $|T| > z_{1-\alpha/2}$.

- Teste de hipótese não-paramétrico de homogeneidade = a homogeneidade significa que os elementos da amostra provêm de uma única população. A rejeição ou não dessa hipótese é decidida por meio do teste proposto por Mann e Whitney (1947):

Dada uma amostra $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, de tamanho N , separando-a em duas sub-amostras $\{X_1, X_2, \dots, X_{N_1}\}$, de tamanho N_1 , e $\{X_{N_1+1}, X_{N_1+2}, \dots, X_N\}$, de tamanho N_2 , de modo que $N_1 + N_2 = N$ e que N_1 e N_2 sejam aproximadamente iguais, com $N_1 \leq N_2$.

Em seguida classificar a amostra inteira (N), em ordem crescente, para cada elemento, anotar a sua ordem de classificação m e se provem da primeira ou segunda sub-amostras. A idéia intuitiva do teste de Mann-Whitney é se as duas sub-amostras não forem homogêneas, os elementos da primeira apresentarão ordens de classificação consistentemente mais baixas (ou mais altas), em relação às ordens de classificação correspondentes à segunda sub-amostra. A estatística do teste V é dada pelo menor valor entre as quantidades:

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1+1)}{2} - R_1 \quad (11)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad (12)$$

Onde: R_I é a soma das ordens de classificação dos elementos da primeira sub-amostra. Se $N_1, N_2 > 20$, e sob a hipótese de que a amostra é homogênea, demonstra-se que V segue uma distribuição Normal de média igual a:

$$E[V] = N_1 N_2 / 2 \quad (13)$$

E variância dada por:

$$\text{Var}[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (14)$$

A estatística do teste pode ser formulada como:

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{\text{Var}[V]}} \quad (15)$$

Sendo um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se $|T| > z_{1-\alpha/2}$

- Teste de hipótese não-paramétrico de estacionariedade = quando há estacionariedade não ocorrem flutuações aleatórias, sendo os dados amostrais invariantes, sem tendências a ‘saltos’, relacionados a alterações bruscas como a construção de barragens, e ciclos, relacionados a flutuações climáticas de longo período. Uma tendência temporal, eventualmente presente em uma série hidrológica X_t , ao longo do tempo t , pode ser detectada pela correlação entre a série e o índice de tempo. Logo, o teste de Spearman detecta a não estacionariedade pelo coeficiente de correlação entre as ordens de classificação m_t , da seqüência X_t , e os índices de tempo T_t , esses iguais a 1, 2, ... , N . A estatística do teste de Spearman tem como base o coeficiente:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (16)$$

Para $N > 10$ e sob a hipótese nula de que não há correlação entre m_t e T_t , pode-se demonstrar que a distribuição de r_s pode ser aproximada por uma Normal de média:

$$E[r_s] = 0 \quad (17)$$

E variância dada por:

$$\text{Var}[r_s] = 1 / (N-1) \quad (18)$$

A estatística do teste de Spearman pode ser formulada como:

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{\text{Var}[r_s]}} \quad (19)$$

Sendo um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se $|T| > z_{1-\alpha/2}$.

Segundo Naghetini e Pinto (2007), seleciona-se as distribuições de probabilidades candidatas com base: nas características físicas do fenômeno em foco, nas possíveis deduções teóricas quanto às propriedades distributivas da variável e na aderência à distribuição empírica dos valores amostrais. Sendo aplicados os principais testes de aderência: Qui Quadrado (χ^2), Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling:

- Teste de aderência do Qui Quadrado (χ^2) = teste de adequação do ajustamento, onde pretende-se determinar se uma dada distribuição teórica é razoável face aos dados disponíveis. Logo, as hipóteses a testar são:

H₀: A função de distribuição é F(x)

H₁: A função de distribuição não é F(x)

O teste faz uma comparação entre o número real de observações e o número esperado, que caíam nas respectivas classes, através do cálculo da estatística:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(O_i - Np_i)^2}{O_i} = \sum_{i=1}^r \frac{(O_i - E_i)^2}{O_i} \quad (20)$$

formada pelas realizações O_i , das variáveis ρ_i , e pelos seus respectivos valores esperados $E_i = E[\rho_i]$, os quais, sob a veracidade da hipótese nula, são iguais a Np_i .

A estatística χ^2 é a soma das diferenças quadráticas entre as realizações das variáveis aleatórias ρ_i e suas respectivas médias populacionais.

A soma das diferenças quadráticas entre N variáveis normais e independentes, e sua média comum μ , possui uma distribuição do χ^2 com $v = N$ graus de liberdade. Sendo possível demonstrar que, quando N tende para o infinito, a estatística χ^2 segue uma distribuição do Qui-Quadrado, com $v = (r-1)$ graus de liberdade.

Para grandes valores de N usa-se esse resultado para testar a hipótese nula H_0 de que as frequências relativas esperadas de ρ_i sejam dadas por Np_i , com p_i calculadas pela distribuição de probabilidades propostas. Um valor elevado da estatística de teste revela grandes diferenças entre as frequências observadas e esperadas, sendo um indicador da pouca aderência da distribuição especificada à amostra (Naghetini e Pinto 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

- Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) = nesse teste não se estimam parâmetros para a distribuição empírica. A estatística de teste é a diferença máxima entre funções de probabilidades acumuladas empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas, considerando se:

$F(x)$ a função teórica da distribuição acumulada admitida como hipótese nula, H_0 ;

$F_0(x)$ a função de distribuição acumulada para os dados amostrais i/n

Calculando as probabilidades teóricas, segundo $F_0(x)$, tendo como argumento os valores $x(m)$. A estatística do teste KS é dada por

$$D_N = \sup |F(x) - F_0(x)| \quad (21)$$

Igual à maior diferença entre as probabilidades empírica e teórica. Se H_0 é verdadeira e quando $N \rightarrow \infty$, a estatística D_N irá tender a zero. Se N é um valor finito, a estatística D_N deverá ser da ordem de grandeza de $1/\sqrt{N}$ e a quantidade $\sqrt{N} D_N$ não irá tender a zero, mesmo para valores muito elevados de N .

Para amostras de tamanho superior a 40, os valores críticos da estatística de teste D_N serão $1,3581/\sqrt{N}$, para o nível de significância $\alpha = 0,05$, e $1,6276/\sqrt{N}$, para $\alpha = 0,01$. Para amostras de tamanho inferior a 40, os valores críticos de D_N devem ser obtidos da Tabela 1. Se, para um determinado nível de significância α , o valor D_N for maior ou igual ao valor D_N da Tabela 1, a hipótese H_0 é rejeitada (Naghetini e Pinto 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

Tabela 1 – Valores críticos da estatística $D_{N,\alpha}$ do teste de aderência KS

N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$	N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$
10	0,369	0,409	0,457	0,489	26	0,233	0,259	0,290	0,311
11	0,352	0,391	0,437	0,468	27	0,229	0,254	0,284	0,305
12	0,338	0,375	0,419	0,449	28	0,225	0,250	0,279	0,300
13	0,325	0,361	0,404	0,432	29	0,221	0,246	0,275	0,295
14	0,314	0,349	0,390	0,418	30	0,218	0,242	0,270	0,290
15	0,304	0,338	0,377	0,404	31	0,214	0,238	0,266	0,285
16	0,295	0,327	0,366	0,392	32	0,211	0,234	0,262	0,281
17	0,286	0,318	0,355	0,381	33	0,208	0,231	0,258	0,277
18	0,279	0,309	0,346	0,371	34	0,205	0,227	0,254	0,273
19	0,271	0,301	0,337	0,361	35	0,202	0,224	0,251	0,269
20	0,265	0,294	0,329	0,352	36	0,199	0,221	0,247	0,265
21	0,259	0,287	0,321	0,344	37	0,196	0,218	0,244	0,262
22	0,253	0,281	0,314	0,337	38	0,194	0,215	0,241	0,258
23	0,247	0,275	0,307	0,330	39	0,191	0,213	0,238	0,255
24	0,242	0,269	0,301	0,323	40	0,189	0,210	0,235	0,252
25	0,238	0,264	0,295	0,317	>40	$1,22/\sqrt{N}$	$1,36/\sqrt{N}$	$1,52/\sqrt{N}$	$1,63/\sqrt{N}$

Fonte: Naghetini; Pinto, (2007).

- Teste de aderência de Anderson-Darling (AD) = o teste procura ponderar mais fortemente as caudas das distribuições, nas quais, as maiores (ou as menores) observações da amostra podem alterar sobremaneira a qualidade do ajuste. Esse teste baseia-se na diferença entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica, $F_N(x)$, e teórica, $F_X(x)$, de variáveis aleatórias contínuas, dando mais peso às caudas, por meio da divisão das diferenças entre $F_N(x)$ e $F_X(x)$ por $\sqrt{F_N(x)[1 - F_N(x)]}$, tornando a estatística do teste como:

$$A^2 = -N - \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1) \{ \ln F_X(x_{(i)}) + \ln [1 - F_X(x_{(N-i+1)})] \}}{N} \quad (22)$$

Onde $\{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(m)}, \dots, x_{(N)}\}$ são as observações em ordem crescente.

Se a estatística A^2 for um valor elevado, as distribuições empírica, $F_N(x)$, e teórica, $F_X(x)$, diferem muito entre si e, devendo a hipótese nula ser rejeitada. A distribuição de probabilidades da estatística do teste AD depende da distribuição de probabilidades hipotética empírica, $F_X(x)$.

2.4.3 Estimativa de Parâmetros

Sendo uma amostra de observações de uma variável aleatória, devemos obter seu modelo distributivo e a estimativa dos parâmetros que o descrevem. As técnicas de extração da informação probabilística e de obtenção das estimativas dos parâmetros a partir de uma amostra de observações são métodos da inferência estatística. Após a escolha da distribuição a ser ajustada aos dados amostrais, seus parâmetros devem ser estimados no cálculo de probabilidades e quantis. Há uma variedade de métodos de estimação de parâmetros, sendo os mais usados: o método dos momentos, o método da máxima verossimilhança e o método dos momentos-L (Naghetini; Pinto, 2007).

Como neste estudo foram estimados os parâmetros pelo método dos momentos-L, será apresentado somente esse método, podendo-se consultar para os demais em Naghetini; Pinto (2007).

- Método dos momentos-L (MML) = o método produz estimadores de parâmetros exigindo um menor esforço computacional para a solução de sistemas de equações menos complexas. Os momentos ponderados por probabilidades (MPP) são definidos pela seguinte expressão geral:

$$M_{p,r,s} = E[X^p [F_X(x)]^r [1 - F_X(x)]^s] = \int_0^1 [x(F)]^p F^r (1 - F)^s dF \quad (23)$$

Onde $x(F)$ denota a função de quantis, e p , r e s representam números reais. Quando r e s são nulos e p é um número não negativo, os MPP's $M_{p,0,0}$ são iguais aos momentos convencionais μ'_p de ordem p , em relação à origem. Sendo os MPP's $M_{1,0,s}$ e $M_{1,r,0}$ os de utilidade mais frequente na caracterização de distribuições de probabilidades e especificados por:

$$M_{1,0,s} = \alpha_s = \int_0^1 x(F)(1-F)^s dF \quad (24)$$

$$M_{1,r,0} = \beta_r = \int_0^1 x(F)F^r dF \quad (25)$$

Foi demonstrado que α_s e β_r possuem a generalidade suficiente para a estimação de parâmetros de distribuições de probabilidades, além de estarem menos sujeitos a flutuações amostrais e serem mais robustos do que os correspondentes momentos convencionais. Porém, os MPP's α_s e β_r , embora passíveis de serem usados na estimação de parâmetros, não são de fácil interpretação como descritores de forma das distribuições de probabilidades. Os momentos-L de ordem r , denotados por λ_r , são combinações lineares dos MPP's α_s e β_r e formalmente definidos por:

$$\lambda_r = (-1)^{r-1} \sum_{k=0}^{r-1} p_{r-1,k} \alpha_k = \sum_{k=0}^{r-1} p_{r-1,k} \beta_k \quad (26)$$

Onde:

$$p_{r-1,k} = (-1)^{r-k-1} \binom{r-1}{k} \binom{r+k-1}{k} \quad (27)$$

O momento-L λ_1 é equivalente à média e uma medida populacional de posição. Para ordens superiores a 1, os quocientes de momentos-L são particularmente úteis na descrição da escala e forma das distribuições de probabilidades. Como medida equivalente ao coeficiente de variação convencional, define-se o coeficiente τ , dado por

$$\tau = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (28)$$

Sendo interpretado como medida populacional de dispersão ou de escala. Analogamente aos coeficientes de assimetria e curtose convencionais, podem ser definidos os coeficientes τ_3 e τ_4 por:

$$\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \quad (29)$$

$$\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \quad (30)$$

Os quocientes de momentos-L amostrais t , t_3 e t_4 são calculados pela substituição de λ_r , por suas estimativas l_r . Se X é uma variável aleatória não negativa, demonstra-se que $0 < \tau < 1$. E esses coeficientes τ_3 e τ_4 estão compreendidos no intervalo $[-1, 1]$, em oposição aos seus correspondentes convencionais que podem assumir valores mais elevados.

O método MML de estimação de parâmetros consiste em igualar os momentos-L populacionais aos momentos-L amostrais. O resultado dessa operação produzirá as estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidades em questão. Sejam y_1, \dots, y_N as observações de uma amostra de uma variável aleatória distribuída, conforme $f_y(y, \theta_1, \dots, \theta_k)$ de k parâmetros. Se $[\lambda_1, \lambda_2, \tau_j]$ e $[l_1, l_2, t_j]$ representam, respectivamente, os momentos-L (e seus quocientes) populacionais e amostrais, o sistema de equações fundamental do método dos momentos-L é

$$\lambda_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = l_i \text{ com } i = 1, 2,$$

$$\tau_j(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = t_j \text{ com } j = 3, 4, \dots, k - 2$$

As soluções desse sistema de k equações e k incógnitas serão as estimativas dos parâmetros pelo método MML (Naghetini e Pinto 2007).

2.4.4 Estimativa dos Quantis

Após a estimativa dos parâmetros de uma distribuição de probabilidades $F_X(x)$, o objetivo é estimar o quantil (X_F), correspondente à probabilidade de não superação F , ou X_T , correspondente ao período de retorno T . O quantil X_F pode ser estimado pela função inversa de F , aqui denotada por $\phi(F)$ ou $x_F = X^*_F = \phi(F)$ ou $x_T = X^*_T = \phi(T)$. Uma medida usada para quantificar a variabilidade presente em X^*_T , e indicar a confiabilidade das estimativas de quantis de variáveis hidrológicas, é dada pelo chamado erro padrão da estimativa (S_T):

$$S_T = \sqrt{E\left[\left\{\hat{X}_T - E\left[\hat{X}_T\right]\right\}^2\right]} \quad (31)$$

Supondo que a distribuição $F_X(x)$ tenha sido corretamente especificada, o erro padrão da estimativa deverá subentender os erros presentes nas estimativas dos parâmetros de $F_X(x)$. A teoria assintótica de distribuições de amostragem demonstra que a distribuição de X^*_T é assintoticamente normal, com média X_T e desvio-padrão S_T , quando $N \rightarrow \infty$. Pode-se construir intervalos de confiança aproximados, a um nível $100(1-\alpha)\%$, cujos limites são expressos por:

$$\hat{X}_T \pm |z_{\alpha/2}| S_T \quad (32)$$

Onde $Z_{\alpha/2}$ representa a variável normal padrão, de probabilidade de não superação igual a $\alpha/2$. O intervalo de confiança aproximado para um quantil X_T a um nível de confiança $100(1-\alpha)\%$ é definido por:

$$\hat{x}_T - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S_T \leq \hat{x}_T \leq \hat{x}_T + Z_{1-\frac{\alpha}{2}} S_T \quad (33)$$

Onde $Z_{1-\alpha/2}$ é a variável normal central reduzida associada à probabilidade $(1-\alpha/2)$ e S_T é o erro-padrão da estimativa de X_T , o qual varia com o modelo distributivo em análise (Naghetini; Pinto, 2007).

2.4.5 Tipos de análise de frequência hidrológica

- Análise de frequência empírica: onde são construídos papéis de probabilidade e técnicas utilizadas na estimação das probabilidades de eventos observados.

A análise de frequência hidrológica local pode ser realizada com ou sem a hipótese de que os dados amostrados sejam oriundos da população de uma determinada distribuição de probabilidades. Em não se admitindo tal hipótese, a análise de frequência se restringe a plotar os pares constituídos pelas frequências empíricas e pelas observações devidamente ordenadas. Essa análise gráfica pode apresentar incertezas que podem ser parcialmente reduzidas pela construção dos chamados “papeis de probabilidades” e/ou pela definição de critérios para estimar as probabilidades empíricas associadas às observações amostrais.

Considere uma amostra x_1, \dots, x_n , atribuindo a estes dados amostrais, uma probabilidade empírica $F(x) = P(X \leq x)$ ou $G(x) = P(X > x)$, é possível marcar estes pares de valores em $[x, F(x)]$ ou $[x, G(x)]$. Este método também serve para avaliar o ajustamento de uma qualquer distribuição teórica de probabilidade à distribuição empírica dos dados amostrais.

A função de distribuição de uma determinada distribuição teórica pode ser representada graficamente em um papel de probabilidade adequado a essa distribuição. Nesse papel, as ordenadas representam os valores da variável X e as abcissas representam a probabilidade de não excedência $F(x) = P(X \leq x)$, a probabilidade de excedência $G(x) = P(X > x)$, o período de retorno T , ou a variável reduzida y . As escalas das ordenadas e das abcissas são feitas de tal modo, que a função de distribuição teórica aparece

representada por uma reta. A verificação visual de linearidade de um conjunto de dados amostrais, plotados em um papel de probabilidades, pode ser empregada para aceitar ou rejeitar a hipótese de aderência a um certo modelo de distribuição de probabilidades.

Se os dados amostrais se ajustam à reta da distribuição teórica, então pode-se afirmar que a distribuição empírica segue a distribuição teórica considerada. Se as n observações (x) forem classificadas por ordem crescente, a probabilidade empírica de X tomar valores inferiores ou iguais a um determinado x_i será:

$$F(x) = (P(X \leq x_i)) = i/n \quad (34)$$

Onde i é o $n.º$ de ordem do valor na amostra. Se as n observações (x) forem classificadas por ordem decrescente, a probabilidade empírica de X tomar valores iguais ou superiores a um determinado x_i será:

$$G(x) = (P(X > x_i)) = i/n \quad (35)$$

Neste caso, o menor valor da população teria uma probabilidade igual a zero e o maior valor uma probabilidade igual a um. Das várias fórmulas existentes para cada valor da amostra de uma probabilidade empírica, a mais generalizada é de Weibull:

$$F(x) = (P(X \leq x_i)) = i / n+1 \quad (36)$$

Para os n dados classificados por ordem crescente e

$$G(x) = (P(X > x_i)) = i / n+1 \quad (37)$$

Para os n dados classificados por ordem decrescente.

Onde: i é posição na amostra ordenada e n é o tamanho da amostra.

A análise de frequência com gráficos de probabilidade apresenta dificuldades, limitando o uso, principalmente quando os quantis de tempos de retorno muito elevados são o principal interesse (Naghetini; Pinto, 2007; Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

- Análise de frequência analítica: análise convencional de frequência de realizações de uma variável aleatória, da qual se conhece uma amostra e a distribuição de probabilidades da população de onde a amostra foi retirada, consiste em estimar os parâmetros populacionais a partir dos dados observados e estimar os quantis para a probabilidade desejada. Entre as diversas distribuições candidatas, aquela que parece mais apropriada à modelação dos dados amostrais. Os procedimentos típicos de uma análise de frequência local de séries anuais são:

a) Avaliação dos dados amostrais = os dados hidrológicos devem satisfazer os atributos de independência, estacionariedade e representatividade. Testes estatísticos não paramétricos são usados na identificação desses atributos.

b) Definição da distribuição de probabilidade, estimação de seus parâmetros e a verificação de aderência à distribuição empírica = existe várias funções de distribuição de probabilidades que podem ser empregadas para a modelação de eventos anuais de variáveis hidrológicas. As distribuições oriundas da teoria clássica de valores extremos: Gumbel, Fréchet e Weibull, são as únicas para as quais existem justificativas teóricas para seu emprego na modelação de valores máximos (ou mínimos) de dados empíricos. Torna-se necessário o emprego de critérios, como indicadores de aderência, para selecionar uma distribuição de probabilidades apropriada. E o exame visual do ajuste entre as distribuições de probabilidades candidatas e os dados observados, pode ser útil na seleção da distribuição de probabilidades apropriada. Para isto, os dados observados são ordenados de forma decrescente e plotados em um papel de probabilidade específico para cada distribuição. A tendência linear dos pontos plotados em papel de probabilidade apropriado indica que a amostra pode ter sido extraída daquela população.

O cálculo dos parâmetros da distribuição pode ser realizado pelos métodos: dos momentos, da máxima verossimilhança e o dos momentos-L, que foram descritos no item 2.4.3. E a verificação do ajuste ou aderência da distribuição teórica à curva da distribuição empírica pode ser realizada aplicando os testes: do Qui-Quadrado, de Anderson-Darling e de Kolmogorov-Smirnov, apresentados no item 2.4.2 (Naghetini; Pinto, 2007).

- Análise de frequência utilizando o fator de frequência: um quantil de uma variável hidrológica pode ser representado pela média μ_x , somada a um desvio ΔX :

$$X = \mu_x + \Delta X \quad (38)$$

O termo ΔX depende da dispersão característica da distribuição de X , do tempo de retorno e de outros parâmetros do modelo probabilístico. O termo pode ser assumido igual ao produto do desvio padrão σ por um fator de frequência k_T , ou seja, $\Delta X = \sigma k_T$. O fator de frequência é uma função do tempo de retorno e da distribuição de probabilidades empregada na análise. Então pode-se reescrever:

$$X = \mu_x + \sigma k_T \quad (39)$$

Substituindo pelas estimativas amostrais tem-se

$$x_T = \bar{x} + s k_T$$

(40)

Onde, x_T é estimativa do quantil associado ao tempo de retorno T ; \bar{x} é a média amostral; s é o desvio-padrão amostral e k_T é o fator de frequência associado ao modelo probabilístico e ao tempo de retorno.

A aplicação do método dos fatores de frequência deve ser feita aos modelos distributivos mais usuais para eventos extremos. O fator de frequência (k_T) é aplicável a muitas distribuições de probabilidade utilizadas na análise hidrológica de frequências, podendo-se determinar uma relação entre o fator de frequência e o correspondente período de retorno. Para determinar o valor de x_T é necessário calcular os parâmetros estatísticos para a distribuição proposta e determinar para um dado período de retorno, o fator de frequência (Naghetini e Pinto 2007).

A seleção do modelo probabilístico que melhor se ajusta aos dados amostrais obriga fazer uso de uma combinação de critérios objetivos e subjetivos. A subjetividade no processo de escolha do modelo pode gerar soluções diferenciadas para uma mesma série hidrológica dependendo dos critérios aplicados. Devido ao pequeno tamanho das amostras disponíveis é impossível comprovar que o modelo selecionado representa a verdadeira distribuição populacional (Rodrigues; Guimarães; Moreira, 2011).

2.5 O USO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS EM ESTUDOS DE SECAS

Os estudos hidrológicos têm como objetivo o entendimento sobre a ocorrência, distribuição e movimento das águas em uma região de interesse. Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos, sobretudo em situações em que há variações das grandezas ao longo do tempo, os pesquisadores necessitam de ferramentas cada vez mais aprimoradas para entender os fenômenos hidrológicos e obter resultados satisfatórios.

Para estudar uma bacia hidrográfica é necessário o conhecimento dos dados hidrológicos disponíveis. Fenômenos como a precipitação, evaporação, infiltração e escoamento superficial dependem de fatores que dificultam sua análise quantitativa. E para entender o funcionamento ou a ocorrência da água na bacia, deve-se entendê-la como um sistema, com uma entrada e uma saída, sendo a entrada a precipitação, o sistema é o modelo e a saída a vazão (Tucci, 1998; Santos, 2009).

Os modelos hidrólogos permitem descrever os processos de hidrologia para fins de pesquisa e formalização do conhecimento sobre os sistemas hidrológicos. Em muitos estudos a utilização dos modelos são para suprir a limitação das técnicas de medição

hidrológica e extrapolar essas medições disponíveis para bacias onde as medições não estão disponíveis ou não são confiáveis. Pois o monitoramento das vazões não é tarefa fácil, não sendo possível realizar as medições de vazão em todos os locais. Logo, através da simulação de vazões obtém-se dados para os estudos, melhorando a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos. Entretanto, é importante a compreensão geral dos conceitos envolvidos, das possibilidades e limitações do modelo adotado (Wagener; Mcintyre, 2007; Beven, 2012).

Os dados hidrológicos de muitos locais são escassos, e quando existem nem sempre estão disponíveis, pois pequena parcela das bacias no mundo é monitorada, causando falta de informações aos estudos. No caso dos eventos extremos, há maior carência ainda, visto que as próprias características dos eventos causam uma limitação ou baixa qualidade dos dados das estações de monitoramento, sendo eventos com poucos registros ao longo do tempo. E apresentam várias dificuldades durante os levantamentos, com incrementos nas incertezas associadas ao equipamento de medição ou no método de estimativa aplicado (Vanelli; Fan; Kobiyama, 2020).

Há quem considere que devesse incluir a modelagem no ensino de Hidrologia, sendo os modelos, ferramentas padrão para resolver questões hidrológicas práticas. Portanto, é importante compreender os conceitos, as possibilidades e as limitações da modelagem hidrológica, para reproduzir o mais próximo da realidade o fenômeno a ser modelado. E devido aos métodos matemáticos utilizados em cada modelo, surgem parâmetros que representam as características e os processos físicos da bacia em estudo (Santos, 2009; Wagener; Mcintyre, 2007; Seibert, 2012).

Os modelos devem considerar processos naturais e gestão de recursos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais, a operação de reservatórios e as retiradas de água. E na modelagem chuva-vazão é necessária compreensão ainda maior das simulações de vazões extremas, sob condições de mudanças climáticas e influências antrópicas, que alteram os recursos hídricos. Pode-se escolher um modelo hidrológico mais simples, mas que represente teoricamente esse sistema, tendo-se que saber interpretar se os resultados das simulações são satisfatórios (Koch *et al.*, 2018).

Vários modelos foram desenvolvidos no passado para simular diferentes processos hidrológicos. No entanto, as discrepâncias entre os valores simulados e observados ainda são significativas e representam um desafio para muitos pesquisadores. Os modelos contêm muitos parâmetros que não podem ser medidos diretamente e os valores da

maioria destes parâmetros são determinados no processo de calibração, condicionando a eficiência de tais modelos (Vidmar *et al.*, 2020).

Muitos pesquisadores têm usado estimativas de modelos hidrológicos, gerando séries temporais sintéticas para avaliar as condições de seca nos diferentes compartimentos do ciclo hidrológico, para avaliar as dinâmicas espaciais e temporais das secas agrícolas e hidrológicas, simular cenários com interferências antropogênicas e mudanças climáticas, em avaliações de secas. Essa abordagem é principalmente considerada em regiões onde o monitoramento é escasso ou inexistente, mas informações sobre a evolução temporal dessa quantidade podem ser obtidas a partir de variáveis de estado de modelos de escoamento superficial ou de superfície terrestre (Raposo *et al.*, 2023).

No caso da Bacia do Rio Meia Ponte, com muitas alterações antrópicas, tornam-se imprescindíveis os estudos com a modelagem hidrológica, para fornecer uma estimativa da vazão e verificar seu comportamento durante as estiagens.

2.5.1 Os modelos hidrológicos nos estudos de vazões mínimas

Para esta pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática sobre modelagem com vazões mínimas, onde foram selecionados 162 artigos sobre estudos específicos sobre modelagem com vazões mínimas, realizados em vários países. Percebeu-se que a maioria dos estudos apresentados nos artigos selecionados já parte do princípio que há muitas incertezas nas simulações de vazões mínimas. Estudam como minimizar os erros ou mesmo eliminar as incertezas que surgem, para obter resultados melhores. E verificam que muitos erros não acontecem na escolha do modelo hidrológico a ser usado, mas são devidos aos dados de entrada no modelo e aos parâmetros incorretos utilizados. Demonstrando a necessidade de melhor preparação dos mesmos, por exemplo com otimização dos parâmetros, para resultar em simulações mais próximas da realidade.

Nesses estudos selecionados, foram encontrados vários modelos hidrológicos, como: HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning), GR4J (Génie Rural model à 4 paramètres Journaliers, TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), entre outros específicos para as regiões em estudo. Sendo o modelo hidrológico mais encontrado o SWAT (Soil Water Assessment Tool), usado em 24 artigos dos 162 selecionados.

Os resultados do estudo de Parra; Arumi; Munoz, (2019) mostraram que a escolha de um modelo que represente adequadamente as características de uma bacia hidrográfica para

simular vazões é fundamental, principalmente em estudos sobre vazões mínimas, cuja principal fonte de geração de fluxo de base depende do armazenamento e lançamento de águas subterrâneas. Sendo importante investigar o desempenho e a representatividade da modelagem do processo de armazenamento-liberação, considerando aspectos como topografia e geologia, para melhorar a previsão de baixos fluxos.

Os estudos sobre modelagem são recentes. Em alguns casos, a combinação de dois ou mais modelos hidrológicos ou modelos calibrados usando métodos de otimização automática e inteligência artificial forneceram melhores resultados. E outros estudos usaram também modelos de água subterrânea em conjunto com os modelos escolhidos, influenciando muito as simulações das vazões mínimas (Kang; Sridhar, 2018; Lan *et al.*, 2018; Parra; Arumi; Munoz, 2019).

Uma deficiência estrutural do modelo hidrológico consiste que algumas características dinâmicas nas condições da bacia hidrográfica não são explicitamente representadas. Em alguns casos, os resultados de uma escolha adequada das estatísticas a serem usadas na otimização dos parâmetros, em um procedimento combinado para melhorar a calibração do modelo hidrológico, verificou-se que uma única calibração resultou em um ajuste perfeito para baixas vazões (Lombardi *et al.*, 2012; Lan *et al.*, 2018; Vidmar *et al.*, 2020).

Em um estudo usando o modelo hidrológico GR5J, testando suas várias versões, foi adicionado um novo parâmetro e conseguiu melhora nos resultados. Mas o nível de desempenho nessas condições pareceu permanecer baixo, apresentando possíveis erros de modelo estrutural, qualidade de dados ou influências artificiais. Portanto, pesquisas específicas devem ser continuadas para melhorar a eficiência dos modelos hidrológicos para simulação de baixo fluxo (Pushpalatha *et al.*, 2011).

Em estudos de avaliação da seca, autores usaram informações meteorológicas semanais para o período de previsão como entradas para estimar as condições de seca agrícola e de água subterrânea, onde foram analisados três índices de seca. Os resultados implicam que as simulações de seca com dois modelos e múltiplos índices de seca são úteis no monitoramento das condições gerais de seca. Mas como a abordagem proposta tem algumas incertezas associadas à estimativa de seca, a combinação com um conjunto de dados de sensoriamento remoto e vários índices climáticos forneceria uma melhor avaliação da previsão de seca no futuro (Kang; Sridhar, 2018).

Respostas hidrológicas foram buscadas em bacias hidrográficas estudadas por Haghghi *et al.* (2020), sob o impacto das mudanças climáticas e alterações no uso e cobertura da terra, utilizando análises estatísticas aos dados hidrológicos e um programa para sensoriamento remoto, avaliando a simulação com o modelo SWAT para modelagem hidrológica. Os resultados foram satisfatórios, mostrando pouco impacto da mudança no uso da terra e indicando que a mudança climática é o principal fator das variações hidrológicas nas bacias em estudo. Porém, os resultados do estudo de Shrestha *et al.* (2016), usando o mesmo modelo hidrológico SWAT associado a três Modelos Climáticos Globais (GCM) mostraram que os parâmetros do modelo e os GCM são os dois principais contribuintes para a incerteza no baixo fluxo. Portanto, há necessidade de incorporar parâmetros de incerteza no modelo hidrológico em estudos de mudanças climáticas e calibração/validação cuidadosas. Uso e cobertura da terra também podem ser influências importantes nas projeções do modelo, sendo que os trabalhos futuros avaliarão as incertezas associadas a esses fatores.

Portanto, em muitos artigos sobre modelagem com vazões mínimas, mesmo onde foram obtidos bons resultados, persistem muitas incertezas, mostrando a necessidade de mais pesquisas como esta.

No presente estudo, foram simuladas vazões utilizando o modelo hidrológico HYMOD. Que foi escolhido por ser simples e com poucos parâmetros, mas considerado eficiente.

2.5.2 Modelo hidrológico HYMOD

O HYMOD é um modelo chuva-vazão concentrado simples, com 5 parâmetros. Muito robusto. O qual considera que a capacidade de armazenamento de água no solo varia ao longo da bacia e que a proporção da bacia com solos saturados varia ao longo do tempo (Wagener *et al.*, 2001; Gesualdo *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020; Bastola, 2022). Resultados de estudos mostram que o HYMOD reproduz satisfatoriamente as séries históricas de vazões, quando comparado a outros modelos (Singh; Marcy, 2017).

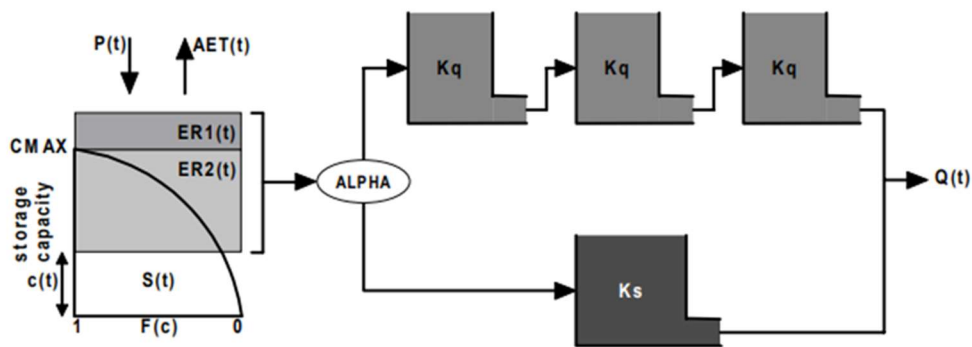
Nesse modelo há um componente de armazenamento não linear, onde são determinados os valores de chuva excedente. Nesse reservatório também são consideradas as perdas por evapotranspiração. A propagação do escoamento superficial na bacia é calculada em duas rotinas, analisadas em paralelo, constituídas por:

- Uma série de três reservatórios para análise do escoamento direto (rápido) da bacia.
- Um reservatório para análise do escoamento de base (lento) na bacia.

Um exemplo da sua estrutura é mostrado na Figura 2, onde:

- $ER1(t)$ e $ER2(t)$ = precipitações efetivas produzidas;
- $F(c)$ = função de distribuição da capacidade de armazenamento;
- C_{MAX} = capacidade máxima de armazenamento na bacia hidrográfica;
- $ALPHA$ = parâmetro em que a precipitação efetiva é distribuída;
- K_q = são os três reservatórios lineares em série;
- K_s = único reservatório com tempo de residência;
- $Q(t)$ = fluxo resultante na etapa de tempo t ;
- $S(t)$ = armazenamento;
- $P(t)$ = entrada de precipitação;
- $AET(t)$ = evapotranspiração real

Figura 2 - Estrutura do modelo hidrológico HYMOD



Fonte: adaptado de Wagener *et al.* (2001).

Na estrutura mostrada no exemplo de modelagem de chuva-escoamento da Figura 2 a precipitação efetiva ($ER1(t)$ e $ER2(t)$) é produzida dependendo do atual estado de umidade da captação descrito pela função de distribuição da capacidade de armazenamento $F(c)$. O parâmetro C_{MAX} descreve a capacidade máxima de armazenamento na bacia. A precipitação efetiva é distribuída em relação ao parâmetro $ALPHA$ e encaminhado através de três reservatórios lineares com tempo de residência K_q em série, ou um único reservatório com tempo de residência K_s . A variável $Q(t)$ é o fluxo resultante na etapa de tempo t . As variáveis restantes são o armazenamento $S(t)$, a entrada de precipitação $P(t)$ e a evapotranspiração real $AET(t)$. (Wagener *et al.*, 2001).

Em resumo, o modelo HYMOD simula um balanço de massa no solo, com cinco reservatórios, sendo o primeiro de montante (C_{MAX}) que simula o solo, com a precipitação $P(t)$ que entra, menos a evapotranspiração $AET(t)$ e menos as precipitações

efetivas $ER1(t)$ e $ER2(t)$. Esse primeiro reservatório tem dois parâmetros: o S_{max} , que simula o tamanho máximo do reservatório ou a maior quantidade de água que se consegue armazenar, e o $Beta$, que junto com o S_{max} é usado para controlar a precipitação efetiva. Quanto mais úmido o solo, mais a precipitação vai virar escoamento (precipitação efetiva). Em seguida a precipitação efetiva é dividida ou separada em duas partes, utilizando o parâmetro de separação $ALPHA$: uma parte para um conjunto de três reservatórios rápidos K_q (fast reservoirs) e outra parte para um reservatório lento K_s (slow reservoir). O parâmetro $ALPHA$ varia de 0 a 1, sendo próximo de 1 o escoamento tende para os reservatórios rápidos e próximo de zero tende para o reservatório lento.

Na parte dos reservatórios rápidos ocorre um balanço entre o escoamento que entra e o que sai, em função de dois parâmetros, R_f (coeficiente de esvaziamento) e S_f , passando pelos três reservatórios e saindo como o escoamento superficial rápido na bacia. Na parte do reservatório lento, a sua entrada se refere à precipitação que não foi direcionada para os reservatórios rápidos, ocorrendo também um balanço, mas em função dos parâmetros R_s (coeficiente de esvaziamento) e S_s . A vazão de saída (simulada) é a soma das vazões que saem das duas partes: do reservatório rápido e do reservatório lento.

No processamento com os dados de entrada da precipitação $P(t)$ e da evapotranspiração $AET(t)$, os cinco parâmetros do modelo (S_{max} , $Beta$, $ALPHA$, R_s e R_f) são otimizados para encontrar a melhor combinação de modo a minimizar o valor do NSE do hidrograma de vazão calculado. Ou seja, o processo apresentar valores dos parâmetros que conferem uma eficiência satisfatória ao modelo hidrológico, segundo Nash-Sutcliffe (1970). Os parâmetros do modelo são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros do modelo HYMOD

Parâmetro	Unidade	Intervalo	Descrição
S_{max}	mm	200 a 500	capacidade máxima do reservatório da rotina de avaliação da umidade do solo
$Beta$	(-)	0,1 a 2	variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo dentro da bacia hidrográfica
$ALPHA$	(-)	0,20 a 1,00	fator de distribuição entre a vazão dos reservatórios de escoamento lento e rápido
R_f	dia	0,0 a 0,9	tempo de residência nos reservatórios de escoamento rápido
R_s	dia	0,0 a 0,1	tempo de residência nos reservatórios de escoamento lento

Fonte: Bastola; Murphy (2013)

2.6 AVALIAÇÃO DAS SECAS COM ÍNDICES

Monitorar as secas é muito importante porque elas atingem áreas maiores do que outros eventos extremos e afetam diversos setores ao mesmo tempo, fazendo delas os eventos extremos naturais que trazem os maiores prejuízos, se considerarmos um horizonte de tempo anual. Como se iniciam em um processo mais lento, as secas permitem que sejam observadas as alterações dos parâmetros: precipitação, fluxo de água, dentre outros. Possibilitando um tempo para a tomada de decisão e busca de soluções para o problema. E o monitoramento da frequência, duração e intensidade da seca é essencial na aplicação de medidas de mitigação dos efeitos decorrentes desta anomalia climática. Na literatura, têm sido usadas diversas metodologias, como o monitoramento da seca por índices de seca (Oliveira Júnior *et al.*, 2012; Gois; Delgado; Oliveira Júnior *et al.*, 2015; Rajsekhar *et al.*, 2015; WMO; GWP, 2016).

Nas últimas décadas vários índices de seca foram derivados, sendo importantes para avaliar o efeito de uma seca e definir diferentes parâmetros de interesse da seca. Devendo ser capazes de quantificar a seca para diferentes escalas de tempo, usando séries temporais longas. A escala de tempo mais comum a ser usada para análise de secas é um ano (12 meses), mas também pode ser um mês. A escala temporal mensal parece ser mais apropriada para monitorar os efeitos de uma seca em situações relacionadas com a agricultura, abastecimento de água e captações de águas subterrâneas (Panu; Sharma, 2002; Mishra; Singh, 2010).

Os índices de seca foram criados com o intuito de identificar, avaliar e monitorar o grau de severidade da seca e o seu tempo de duração. Podendo se adaptar a diferentes perspectivas ou categorias de seca. São consideradas ferramentas úteis para a compreensão e avaliação dos fenômenos meteorológicos, hidrológicos e agrícolas, pois são responsáveis pelo monitoramento, caracterização temporal e espacial. E quando aliados a outras técnicas de análise, como a modelagem hidrológica, possibilitam identificar tendências e padrões de variabilidade temporal e espacial dentro das regiões em estudo (Gonçalves, 2021; Medeiros, 2016).

Não existe um único indicador ou índice que seja aplicável para monitorar todos os tipos de seca, cada um está relacionado ao tipo de seca e ao impacto que se deseja analisar. Praticamente, todos os índices utilizam como variável de entrada a precipitação, podendo-se associar a variáveis como temperatura, evapotranspiração e vazão. Essas combinações são feitas, com o intuito de gerar diferentes tipos de índices para monitorar os diversos

tipos de seca de uma região. Uma vez que é feita a identificação e definição de quais índices são os mais adequados para uma região, pode haver uma recomendação de uso e vinculação das ações dentro de um plano de seca (Svoboda; Fuchs, 2016; Mishra; Singh, 2010; Bevacqua, 2021; Yihdegol *et al.*, 2019).

Uma série temporal de índices de seca fornece uma estrutura para avaliar parâmetros, com isso é possível categorizar as definições de seca em quatro abordagens diferentes, relacionados ao tipo de impacto gerados sobre os usuários da água: seca meteorológica, seca agrícola, seca hidrológica e seca socioeconômica. Como um processo, onde as secas podem ser representadas com uma sucessão temporal, se iniciando na seca meteorológica, desencadeando uma série de eventos que resultam na seca agrícola e posteriormente na seca hidrológica. Por último ocorre a seca socioeconômica, que impacta os setores sociais, ambientais e econômicos (American Meteorological Society, 2004; Fernandes *et al.*, 2009; Mishra; Singh, 2010; Junqueira, 2019).

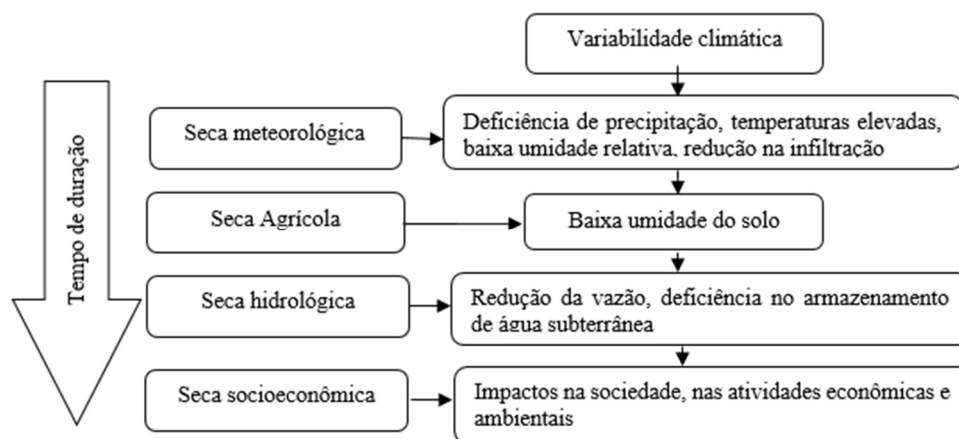
A seca meteorológica é definida como falta de precipitação sobre uma região, por um período de tempo, sendo a precipitação usada nesta análise. A seca hidrológica está relacionada a um período com condições de baixos níveis dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. E para avaliação dos usos de água de um determinado sistema de gestão de recursos hídricos, sendo os dados de vazão amplamente aplicados para análise de seca hidrológica. A seca agrícola refere-se a um período com declínio da umidade do solo e conseqüente perda de colheita, dependendo de vários fatores que afetam a meteorologia e secas hidrológicas, juntamente a diferenças entre evapotranspiração real e evapotranspiração potencial. Vários índices de seca, baseados na combinação de precipitação, temperatura e umidade do solo, foram derivados para estudar secas agrícolas. A seca socioeconômica está associada à falta de água em sistemas de recursos naturais, ocorrendo quando a demanda por um bem econômico excede o abastecimento, como resultado de uma escassez de água relacionada ao clima (American Meteorological Society, 2004; Mishra; Singh, 2010).

Vários estudos discutiram esses quatro tipos de secas, mas não foram incluídas as águas subterrâneas na classificação, sendo importante introduzir essa variável como um tipo de seca. E poucas pesquisas foram feitas sobre a ocorrência e propagação de secas nas águas subterrâneas (American Meteorological Society, 2004; Mishra; Singh, 2010).

Na Figura 3 está representada uma sucessão temporal de uma seca, onde o processo se inicia na seca meteorológica, ocorrendo séries de eventos que resultam na seca agrícola,

evoluindo para a seca hidrológica e por último a seca socioeconômica, que impacta os setores sociais, ambientais e econômicos (Fernandes *et al.*, 2009; Bevacqua, 2021).

Figura 3 - Sucessão temporal de uma seca e seus impactos



Fonte: Adaptado de Fernandes et al. (2009) e Bevacqua (2021).

No monitoramento das secas é importante considerar mais de um indicador, pois a combinação entre eles permite uma avaliação mais completa, aumentando a confiabilidade dos estudos. Como há incertezas relacionadas à deficiência dos dados hidrológicos e nas escalas temporais das séries, são usados também índices de seca baseados na análise de séries históricas de vazão, como o Índice Padronizado de Vazão (Standardized Streamflow Index – SSI), para melhorar o desempenho dos sistemas de monitoramento, comparado àqueles que utilizam somente as séries de precipitação (Vicente-Serrano *et al.*, 2012; Fernandes *et al.*, 2021; Pereira, 2022).

As secas hidrológicas são melhor caracterizadas usando o índice de vazão padronizado SSI, combinado ao SPI. Na análise das secas agrícolas e socioeconômicas são usados índices multivariados, como o índice de precipitação e evapotranspiração padronizado (Standardized Precipitation and Evaporation Index – SPEI) (Bevacqua, 2021).

Para o cálculo dos índices de seca deste estudo foram utilizados os índices: Standardized Precipitation Index (SPI) – índice padronizado de precipitação, Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) - Índice Padronizado de Evapotranspiração da Precipitação e o Standardized Streamflow Index (SSI) - índice de fluxo padronizado.

Um índice de seca padronizado pode ser obtido a partir de séries temporais longas usando uma função de distribuição cumulativa, em seguida calcula-se a probabilidade acumulada

de um valor mensal usando uma função de distribuição de densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados observados. Para o cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), geralmente usa-se a distribuição Gama e para o cálculo do Índice Padronizado de Evapotranspiração de Precipitação (SPEI) pode-se usar a distribuição log-logística (Vicente-Serrano, 2012).

Para o uso do Índice Padronizado de Fluxo (SSI), o mais usado na caracterização de secas hidrológicas, que permite comparações espaciais e temporais precisas de condições hidrológicas de um curso d' água, onde os fluxos são caracterizados pela variabilidade espacial maior que a das variáveis climáticas e a sazonalidade está sujeita a intensas mudanças, ocorre maior variabilidade da função de distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados mensais de vazão. Esta variabilidade torna difícil selecionar a distribuição mais apropriada para calcular o SSI ao longo de uma ampla área, tendo-se que testar várias distribuições para selecionar qual melhor descreve os dados de vazão (Vicente-Serrano, 2012; Junqueira *et al.*, 2020; Raposo *et al.*, 2023).

Em resumo, o índice SPI é aplicado a dados de precipitação para avaliar secas, enquanto o índice SSI é uma medida semelhante aplicada a dados de vazão para analisar anomalias de vazão em relação à média histórica. Ambos os índices são valiosos para avaliar e monitorar condições hidrológicas. Porém, visando uma análise mais completa dos eventos das secas é também utilizado o índice SPEI, que leva em consideração a evapotranspiração, item importantíssimo no balanço hídrico da bacia.

Os índices padronizados são considerados ferramentas simples, que permitem entender a dinâmica das secas no tempo e no espaço, e comparar eventos em diferentes bacias hidrográficas e climas contrastantes (Raposo *et al.*, 2023).

O SPI foi recomendado pela World Meteorological Organization (WMO) como índice universal na análise e no monitoramento de secas meteorológicas, para uso generalizado em países que desejam monitorar as secas, devendo ser o índice padrão disponível em todo o mundo, em adição aos índices e indicadores locais exclusivos (Hayes *et al.*, 2011; WMO, 2016; Pereira, 2022). Sendo assim, os vários órgãos que realizam o monitoramento das secas no Brasil usam o índice SPI.

O monitoramento das secas no Brasil é feito por órgãos como: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE,

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, sendo que todos usam os índices de seca.

Portanto, a avaliação das secas em uma bacia, apresentando uma evolução desde seca meteorológica até seca socioeconômica, contribui para ações no planejamento e gestão.

2.6.1 Índice de seca padronizado (SPI)

O índice de seca mais utilizado para avaliações de seca é o Índice de Seca Padronizado (Standardized Precipitation Index – SPI). Pois ao longo dos anos, muitos índices de seca foram desenvolvidos e utilizados por meteorologistas e climatologistas de todo o mundo. Mas como os cientistas precisavam de um índice simples, fácil de calcular e estatisticamente relevante e significativo, foi desenvolvido o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), pelos cientistas McKee, Doesken e Kleist (1993). Sendo a precipitação o único parâmetro de entrada necessário. E igualmente eficaz para analisar períodos e ciclos úmidos, como na análise de períodos e ciclos secos (WMO, 2012).

Muitos estudos mostraram que os resultados da aplicação do SPI indicam condições de seca ou umidade excessiva e são fundamentais para o gerenciamento dos recursos hídricos. Destacam a capacidade de mensurar tais condições climáticas em diferentes escalas temporais: mensal, trimestral, semestral, anual, até 24 meses (Terassi, 2018).

O cálculo do SPI é baseado no registro de precipitação de longo prazo para um período, ajustado a uma distribuição de probabilidade, sendo utilizada em muitos estudos a distribuição Gama, pois apresenta um ajuste confiável à distribuição de precipitação. Em seguida essa distribuição é transformada em uma distribuição normal, com média 0 e desvio padrão 1, sendo que o SPI médio para o local e período desejado seja zero. Valores positivos de SPI indicam precipitação maior que a mediana e valores negativos inferior à mediana (Edwards; McKee, 1997; Siqueira; Nery, 2015; Pereira, 2022).

A distribuição Gama é definida pela função de densidade de probabilidade dada por:

$$g(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (41)$$

Onde: $\alpha > 0$ é o parâmetro de forma (adimensional); $\beta > 0$ é o parâmetro de escala (mm) e $x > 0$ é o total de precipitação (mm).

A função Gama é dada por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (42)$$

Os parâmetros α e β da função densidade de probabilidade Gama são estimados para cada estação e escala de tempo de interesse, utilizando o método da máxima verossimilhança, em que:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (43)$$

$$\beta = \frac{X}{\alpha} \quad (44)$$

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x) \quad (45)$$

Sendo: N o número de observações da amostra e \bar{x} o valor médio dos dados de chuva. Os resultados dos parâmetros de forma e escala são usados para encontrar a probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observado, para uma determinada escala de tempo mensal. A função acumulada de probabilidade Gama é:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (46)$$

Como a função Gama não é definida para $x = 0$, mas a amostra dos dados de precipitação pode conter zeros, a probabilidade acumulada é dada por:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (47)$$

Onde: $H(x)$ = distribuição de probabilidade cumulativa; q = probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros); $G(x)$ = distribuição cumulativa teórica.

Sendo que m é o número de zeros em uma série temporal de precipitação e n = tamanho da amostra, então q pode ser estimado por m/n .

Segundo Abramowitz e Stegun (1965), o valor de (Z) ou SPI é obtido mais facilmente pela aproximação matemática que converte a probabilidade cumulativa em uma distribuição normal a variável Z , definida por:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (48)$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (49)$$

Onde:

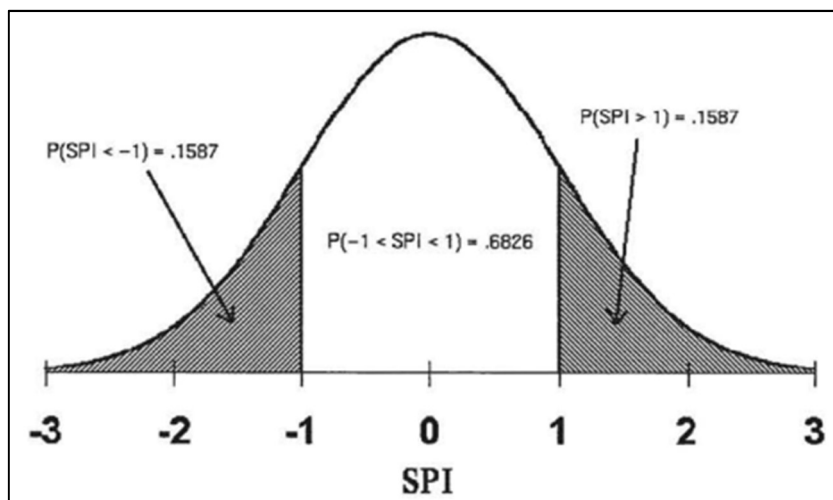
$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (50)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - (H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (51)$$

Os coeficientes utilizados nas equações são: $C_0 = 2,515517$; $C_1 = 0,802853$; $C_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$.

A Figura 4 mostra que, durante o período base, em que os parâmetros Gama são estimados, o SPI terá uma distribuição normal com valor esperado 0 e variância 1. Um índice com essas características é desejável, permitindo comparações de valores do índice para diferentes localidades e regiões (Edwards; McKee, 1997; Fernandes *et. al.*, 2009; Siqueira; Nery, 2015; Pereira, 2022).

Figura 4 - Distribuição normal com o SPI tendo média 0 e variância 1



Fonte: Edwards; McKee (1997)

O sistema de classificação usado por McKee, Doesken e Kleist (1993) está mostrado no Quadro 2, com os valores do SPI, para definir as intensidades de seca resultantes.

Um evento de seca ocorre sempre que o SPI está negativo, com valor -1,0 ou menos. O evento termina quando o SPI se torna positivo. Os valores menores ou iguais a -2 indicam “seca extrema” e os maiores ou iguais a +2 indicam “umidade extrema”.

Quadro 2 - Valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

Valor do SPI	Classificação
$\geq 2,0$	Extremamente úmido
1,5 a 1,99	Muito úmido
1,0 a 1,49	Moderadamente úmido
- 0,99 a 0,99	Próximo do normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Severamente seco
$\leq -2,0$	Extremamente seco

Fonte: adaptado de McKee, Doesken e Kleist (1993)

Portanto SPI foi concebido para quantificar o déficit de precipitação em múltiplas escalas temporais. Estes prazos refletem o impacto da seca na disponibilidade dos diferentes recursos hídricos. O índice SPI com escala de 1 a 3 meses é usado para avaliar a seca meteorológica, de 3 a 6 meses para a seca agrícola, de 6 a 12 meses para análises de seca hidrológica e de 24 a 48 meses para avaliar a seca socioeconômica.

2.6.2 Índice de fluxo padronizado (SSI)

O Índice de fluxo padronizado (Standardized Streamflow Index – SSI), é usado para avaliar anomalias de vazão em relação à média histórica.

Para o cálculo do SSI é utilizada a mesma metodologia do SPI. Porém são usados os dados de vazão, permitindo avaliar déficit ou excessos de vazão em diferentes escalas de tempo (1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses), assim como o SPI faz para a precipitação.

O SSI foi criado por Modarres (2007) e aprofundado por Telesca *et al.* (2012), sendo descrito por Vicente-Serrano *et al.* (2012) e tem capacidade de adicionar informações confiáveis e diretas sobre a extensão espacial e severidade das condições de seca hidrológica. O SSI possui como dados de entrada o fluxo de água de um curso d'água, a vazão, em uma escala de tempo diária ou mensal, permitindo o monitoramento das condições hidrológicas em múltiplas escalas temporais. O SSI é um índice de fácil uso, pois necessita de um único parâmetro de entrada, podendo ser calculado usando programas ou planilhas de cálculo do SPI. Mas é importante ressaltar que o SSI considera apenas a vazão do curso d'água para o monitoramento da seca, não considerando outras influências (Modarres, 2007; WMO; GWP, 2016; Pereira, 2022).

A classificação da seca pelo SSI se baseia na mesma classificação do SPI (Quadro 2).

2.6.3 Índice padronizado de evapotranspiração e precipitação (SPEI)

O Índice Padronizado de Evapotranspiração e Precipitação (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index - SPEI), foi proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2010) como um índice de seca melhorado que é especialmente adequado para estudos sobre o efeito do aquecimento global na severidade da seca. O SPEI considera o efeito da evapotranspiração na severidade da seca, mas permite identificação de diferentes tipos de seca e impactos da seca em diversos sistemas. É simples de calcular, como o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2012).

O procedimento de cálculo do SPEI é semelhante ao do SPI, mas utiliza o “balanço hídrico climático”, tendo como entrada a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração. Esse balanço hídrico climático compara a água disponível com a demanda evaporativa atmosférica, fornecendo uma medida mais confiável da gravidade da seca do que apenas considerar a precipitação. O SPEI é calculado também para várias escalas de tempo (1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses), e os valores resultantes são ajustados a uma distribuição de probabilidade log-logística ou Gama para transformar os valores da série em unidades padronizadas, que são comparáveis no espaço e no tempo, em diferentes escalas. O SPEI tem sido utilizado em diversos estudos que analisaram a variabilidade da seca (Beguería *et al.*, 2014).

Logo, dada uma série temporal do balanço hídrico climático (precipitação menos evapotranspiração potencial), fornece uma série temporal do SPEI.

O SPEI também pode ser calculado usando programas ou planilhas de cálculo do SPI. E a classificação da seca se baseia na mesma classificação do SPI, mostrada no Quadro 2.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar as secas na Bacia do Rio Meia Ponte, além do histórico de ocorrências na bacia, foram realizadas pesquisas literárias sobre o tema da escassez hídrica no mundo, contemplando a problemática das secas, nos cenários de uso e cobertura do solo com alterações antrópicas e mudanças climáticas. Também foi realizada uma revisão sistemática da literatura, buscando estudos sobre secas que utilizaram modelos hidrológicos e/ou índices de seca, para formalizar essa metodologia em avaliações de secas.

Foi necessária uma caracterização física e socioeconômica, e um levantamento dos dados hidrológicos, analisando as influências das alterações nos usos do solo e da água, e das mudanças climáticas, no comportamento das vazões mínimas ao longo do tempo, bem como as influências dessas alterações no balanço hídrico da bacia. Sendo realizadas análises estatísticas aos dados de chuva e vazões mínimas, e simulações das vazões utilizando um modelo hidrológico.

E na avaliação das secas foram aplicados três índices de seca padronizados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA EM ESTUDO

A caracterização física é resultante de levantamentos e análises de dados do local em estudo, para compreender a ocorrência ou comportamento de um fenômeno.

A caracterização geomorfométrica do uso dos solos de uma bacia é importante para o entendimento dos processos que envolvem o balanço hidrológico e para dar suporte às análises hidrológicas e ambientais (Goularte *et al.*, 2013; Callil *et al.*, 2021).

Estudos mostram que as mudanças climáticas e as alterações no uso e cobertura dos solos ocorridas nas últimas décadas têm causado muitos impactos no regime dos recursos hídricos. E avaliam a influência dessas mudanças. Simulações hidrológicas mostraram fortes correlações entre mudanças na cobertura da terra e no comportamento da bacia hidrográfica em estudo (Savary *et al.*, 2009).

As secas são fenômenos naturais, mas os conflitos pelos usos da água podem aumentar a pressão sobre os recursos hídricos, agravando as secas. Para analisar os efeitos das mudanças no uso do solo ou na gestão das águas, da variabilidade e alteração do clima nos recursos hídricos, são necessários modelos que integrem os processos hidrológicos

Quadro 3 - Características da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte

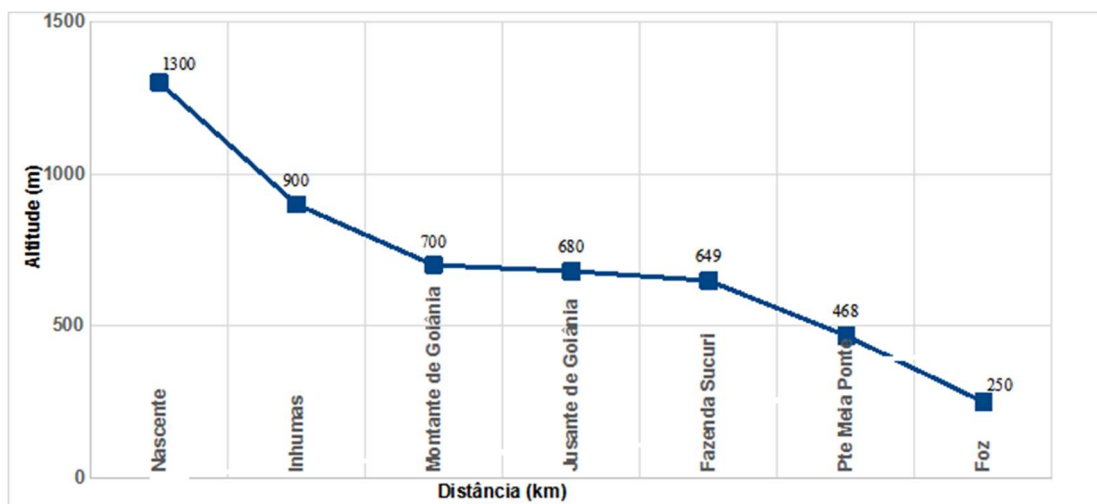
Características	Valores obtidos
Área de drenagem (km ²)	12323
Perímetro (km)	704
Comprimento do Rio Principal (km)	415
Declividade do Rio Principal (m/m)	0,440
Coefficiente de Compacidade (Kc)	1,788
Fator de Forma (F _f)	0,137

Fonte: a autora.

De acordo com o Quadro 3, os valores do coeficiente de compacidade (Kc) e do fator de forma (F_f) mostram que a bacia em estudo não é sujeita a grandes enchentes. Pois com valores de Kc > 1,5 e F_f < 0,50 e a bacia é alongada, (Villela e Mattos, 1975).

A Figura 6 mostra um perfil longitudinal do Rio Meia Ponte, podendo-se observar a diferença entre as altimetrias da nascente e da foz, passando pelas altitudes das estações fluviométricas selecionadas para o estudo.

Figura 6 - Perfil longitudinal do Rio Meia Ponte da nascente até a foz.



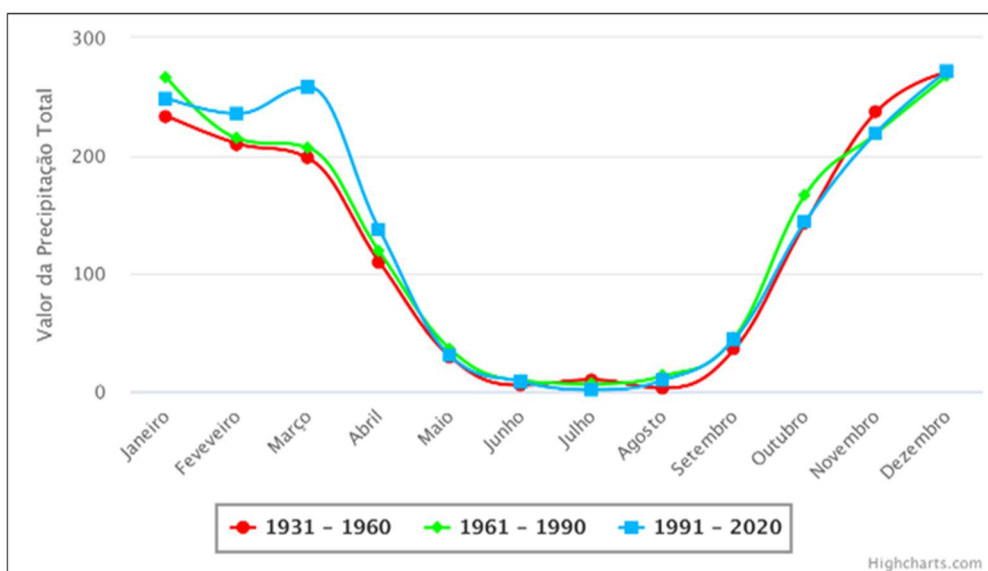
Fonte: a autora.

3.1.2 Caracterização climática

O clima na Bacia do Rio Meia Ponte é o Aw-tropical semi-úmido, segundo a classificação de Köppen, sendo este o clima de Savana, com duas estações bem definidas: uma chuvosa de outubro a abril e outra seca de maio a setembro. As temperaturas máximas variam entre 28°C e 38°C e as mínimas entre 17°C e 18°C. A umidade relativa do ar varia entre 68 e 70% (Rocha;Veiga, 2003; Amaral; Rosa; Formiga, 2021; Classificação, 2024).

A Figura 7 mostra um gráfico do INMET comparativo das precipitações acumuladas na estação Goiânia (83423), obtidas das Normais Climatológicas, com as variações mensais ao longo dos períodos: 1931-1960, 1961-1990 e 1991-2020.

Figura 7 - Variação das precipitações acumuladas na estação Goiânia (INMET).



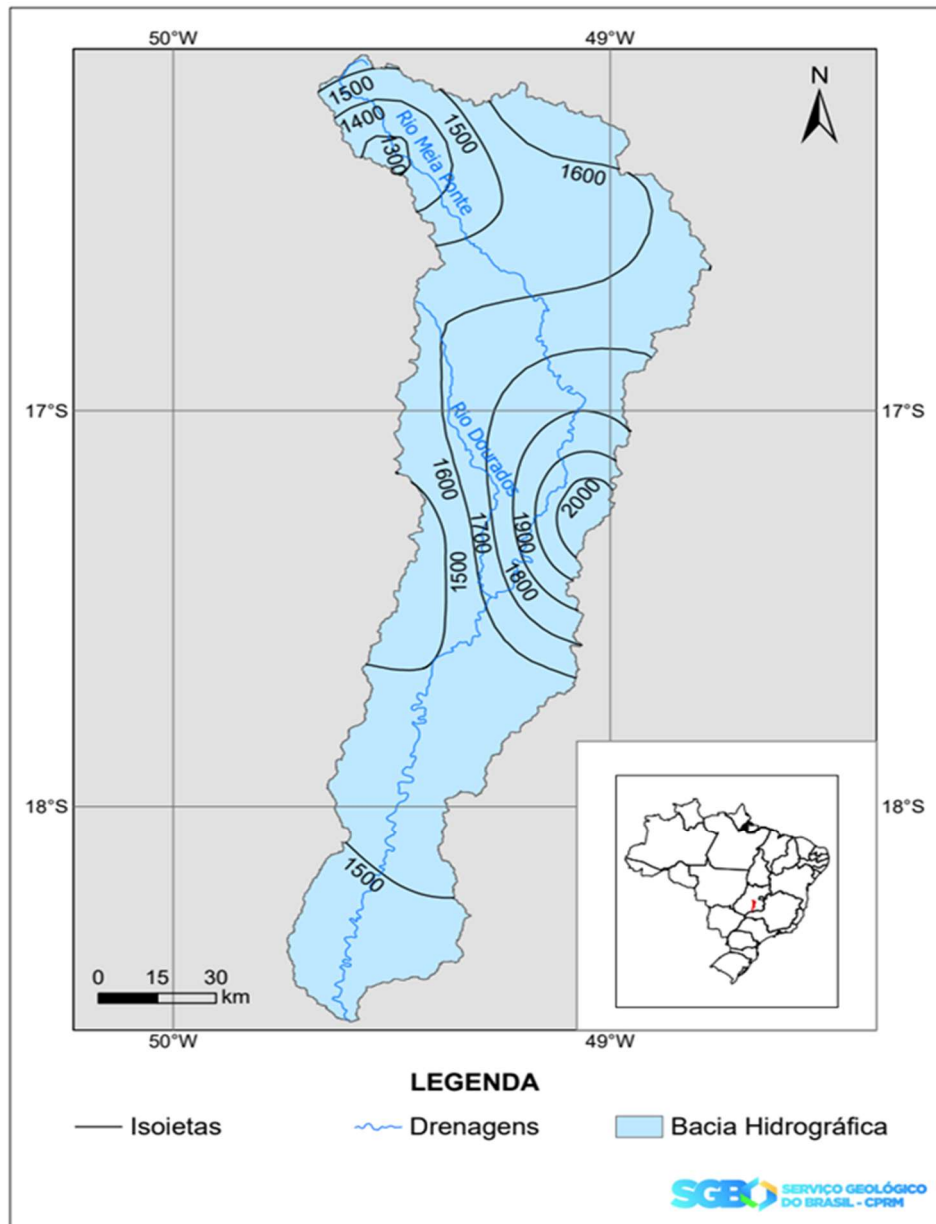
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024)

Observa-se na Figura 7 que nos meses de junho a agosto praticamente não há precipitações ou os valores são próximos a zero.

A precipitação média na bacia foi calculada pela média aritmética e pelo método de Thiessen. Os resultados foram muito próximos, sendo por Thiessen igual a 1523 mm e pela aritmética igual a 1511 mm. Isto porque a bacia se situa em relevo suave ondulado.

O mapa de isoietas da Figura 8 mostra a variação dos totais anuais médios de precipitação na bacia, de 1300 mm até 2000 mm.

Figura 8 - Mapa de isoietas dos totais anuais de precipitação na Bacia do Rio Meia Ponte



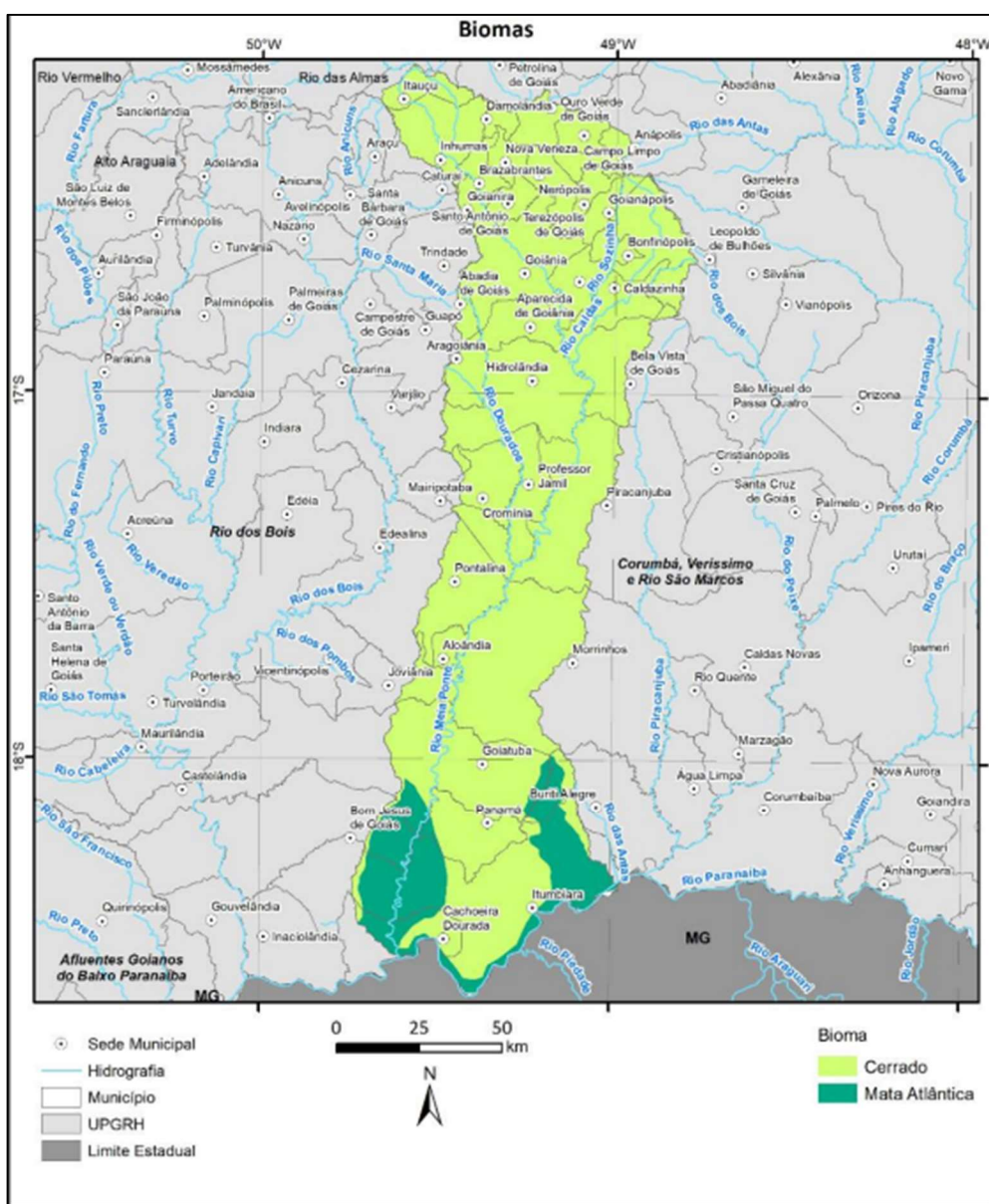
Fonte: Adaptado de Atlas Pluviométrico do Brasil (disponível em <https://www.sgb.gov.br/publicue/Hidrologia/Estudos-Hidrologicos-e-Hidrogeologicos/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-6604.html>)

3.1.3 Biomas

A Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte é dividida em Cerrado e Mata Atlântica, com o Cerrado ocupando a maior parte (89% da área total) e a Mata Atlântica ocupando os 11% restantes, situando ao sul da bacia (Goiás, 2023a).

A Figura 9 mostra a distribuição dos biomas pela Bacia do Rio Meia Ponte.

Figura 9 - Biomas presentes na Bacia do Rio Meia Ponte



Fonte: Diagnóstico da UGRH do Rio Meia Ponte – (Produto 2) – Versão 7.0. (Goiás, 2023a).

Reconhecido como a savana mais rica do mundo em biodiversidade, Cerrado possui muitas tipologias em sua flora e fauna, sendo que algumas espécies só ocorrem nesse bioma. O Cerrado é o segundo bioma do Brasil em extensão e biodiversidade, e o principal em produção de grãos, possuindo a menor porcentagem de área legalmente protegida. Sua cobertura vegetal natural e antrópica é uma das mais difíceis de ser mapeada por ter elevada sazonalidade e dinâmica espaço-temporal da ocupação agrícola. Em Goiás, os Cerrados mantiveram-se quase inalterados até a década de 1950, mas com a transferência da Capital Federal para Brasília na década de 1960, e a abertura de novas

rodovias na região, a cobertura vegetal natural cedeu lugar à pecuária e a agricultura intensiva (Sano *et al.*, 2007; IBGE, 2023).

O Bioma Mata Atlântica foi identificado como a quinta área mais ameaçada e rica em espécies endêmicas do Mundo, com espécies que só ocorrem neste bioma. Atualmente sua área encontra-se reduzida e fragmentada com remanescentes florestais localizados principalmente em áreas de difícil acesso (IBGE, 2023).

3.1.4 Hidrogeologia e relevo

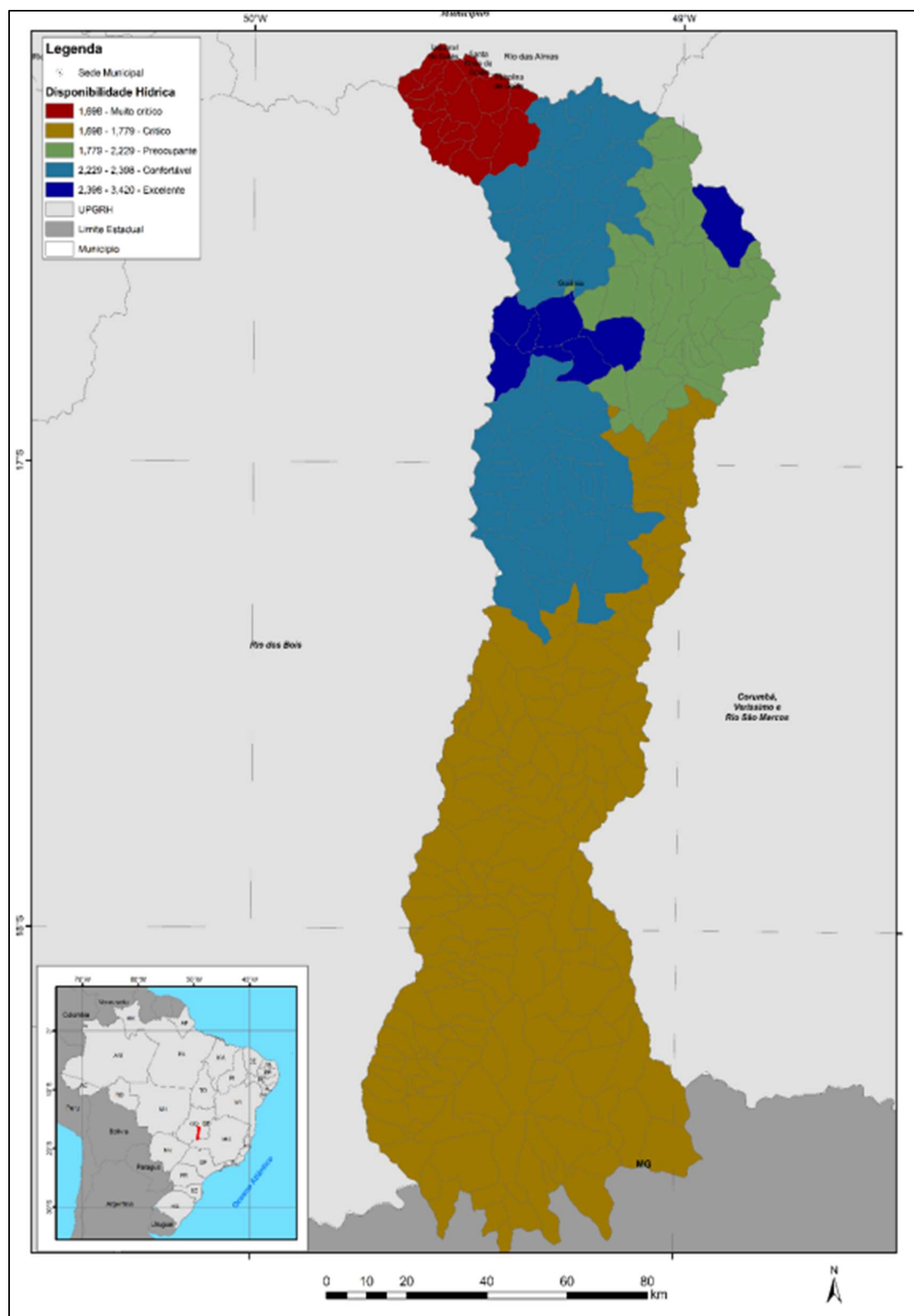
Na litologia na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, pode-se verificar três grandes regiões: na porção norte há heterogeneidade de rochas ígneas, metamórficas e misturas de rochas metamórficas com sedimentares, ocorrendo várias falhas geológicas, nas transições entre os tipos de litologias. A porção central da bacia apresenta litologia mais homogênea, predominando rochas metamórficas, poucas manchas de rochas sedimentares e ígneas, também com ocorrência de falhas geológicas, nas rochas metamórficas. Até sua foz, a litologia possui grandes áreas de rochas ígneas, misturas de rochas ígneas e metamórficas, com pequenas áreas de rochas sedimentares. Nos locais de rochas metamórficas e ígneas, o relevo apresenta-se mais movimentado devido aos dobramentos, ocorrendo falhas geológicas, que abastecem os depósitos subterrâneos de águas. Nos locais onde predominam rochas sedimentares o relevo é plano, com grande permeabilidade, facilitando a recarga de águas subterrâneas (Goiás, 2023a).

Quanto à disponibilidade hídrica subterrânea, os volumes de água acumulados nos aquíferos podem ser utilizados para atender as necessidades de abastecimento público e demais usos, sendo que parte desse volume deve ser mantido para que este seja utilizado na alimentação dos cursos d'água. Os resultados da disponibilidade hídrica subterrânea estão apresentados no Mapa de Disponibilidade Hídrica Subterrânea (Goiás, 2023a).

Pode-se ver segundo a classificação de disponibilidade hídrica da Figura 10, que ao norte da bacia é “muito crítico”, passando por “confortável” a “excelente” em trechos médios da bacia, até chegar a classificação de “crítico” dos trechos médios ao sul da bacia.

Em estudos hidrológicos como este são utilizados como apoio os dados hidrogeológicos disponíveis do local, principalmente em locais onde há grande variação nos tipos de aquíferos e de sua capacidade de permear água. Para explicar o comportamento e a variação das vazões superficiais ao longo do ano (Melo, 2013).

Figura 10 - Disponibilidade hídrica subterrânea na Bacia do Rio Meia Ponte

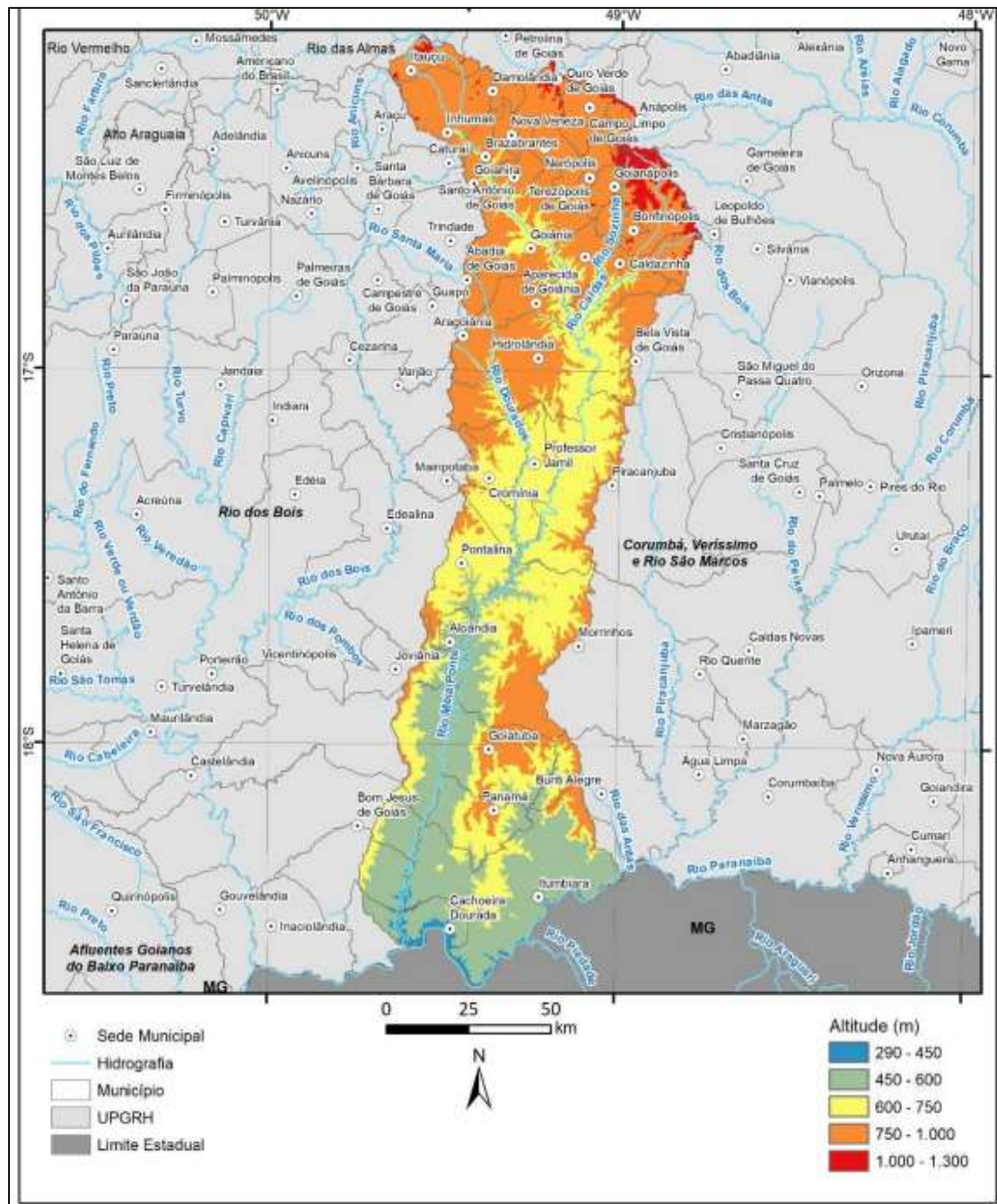


Fonte: Diagnóstico da UGRH do Rio Meia Ponte – (Produto 2) – Versão 7.0. (Goiás, 2023a).

Quanto à altimetria, a bacia apresenta variação de 764 metros. Na porção norte são as maiores altitudes, superiores a 1000 metros, e na porção sul as menores altitudes, com pouco mais de 250 metros, já na foz da bacia com o Rio Paranaíba. A declividade

apresenta grande variação, ocorrendo várias localidades planas e outras onde a declividade chega a quase 43° de inclinação. Considerando a declividade média, a bacia possui relevo suave ondulado, com predomínio dos Latossolos e áreas com Argissolos. A Figura 11 ilustra a hipsometria da bacia, com a variação das altitudes (Goiás, 2023a).

Figura 11 - Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte



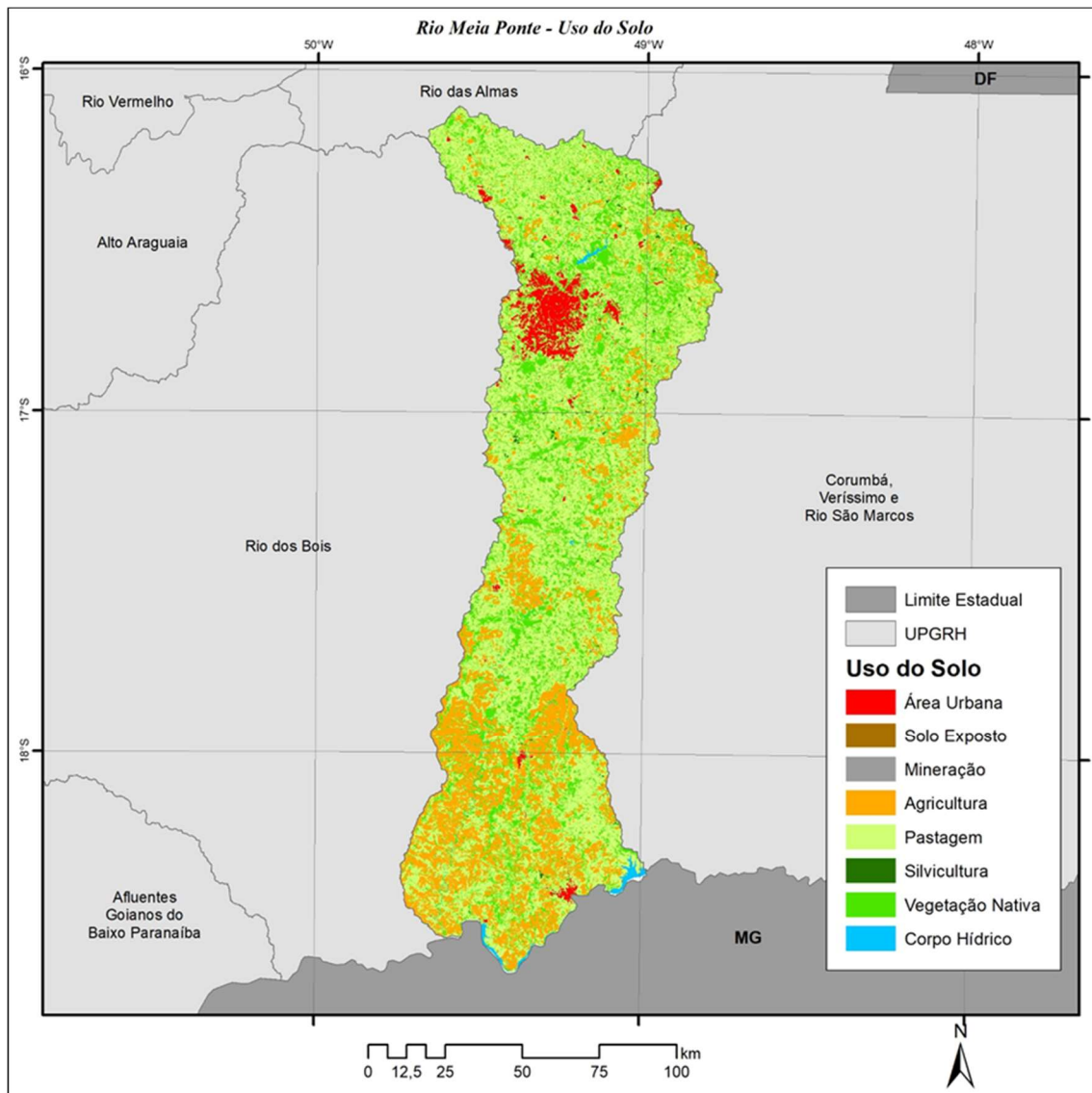
Fonte: Diagnóstico da UPRH do Rio Meia Ponte – (Produto 2) – Versão 7.0 (Goiás, 2023a).

3.1.5 Uso e ocupação do solo

A Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte possui a maioria de sua área ocupada com a agropecuária, sendo 51,9% pastagens, 20,6% lavouras, 3,4% de área urbana, 22,9%

vegetação natural, com os restantes 0,8% de corpos hídricos e 0,4% de silvicultura. No mapa de classificação de uso do solo (Figura 12), pode-se ver que a região norte da bacia hidrográfica possui uma grande área urbana, incluindo a região metropolitana de Goiânia. E a região sul possui extensas áreas de lavouras e de pastagens (Goiás, 2023a).

Figura 12 - Mapa de classificação de uso do solo na Bacia do Rio Meia Ponte



Fonte: Diagnóstico da UPGRH do Rio Meia Ponte – (Produto 2) – Versão 7.0 (Goiás, 2023a).

A maior área de vegetação nativa da bacia localiza-se a nordeste de Goiânia: Área de Proteção Ambiental do Ribeirão João Leite (APA do João Leite). Outras áreas de proteção são: o Parque Estadual Telma Ortegal (área que preserva o entorno do depósito radioativo derivado do acidente ocorrido em Goiânia em 1987), município de Abadia de Goiás, e o Refúgio de Vida Silvestre do Meia Ponte, município de Goiatuba, além de outras Reservas Particulares do Patrimônio Natural em diferentes municípios (Goiás, 2023a).

3.2 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA

A Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte possui 42 municípios, incluindo a capital Goiânia, com a maior população de 1.555.626 habitantes, enquanto que Aloândia com 1.976 habitantes possui a menor população. Essa região é uma das mais desenvolvidas do Estado nos setores de comércio e da agroindústria, justamente por estarem próximos à capital Goiânia, aumentando a demanda pelo uso da água para o consumo e como matéria-prima para a produção industrial e agrícola (Goiás, 2023a).

O PIB na bacia é composto pela maioria no setor de serviços (61,50%), seguido pelos setores industrial (21,46%) e administrativo (14,43%), com os restantes 2,61% do setor agropecuário. Porém, a agropecuária é uma atividade econômica importante em Goiás, pois a produção de carnes e grãos impulsiona as exportações. E dentro da bacia hidrográfica existem estabelecimentos rurais da agricultura familiar, algumas comunidades rurais, como os assentamentos de reforma agrária, comunidades indígenas e comunidades quilombolas. O PIB total da bacia compõe 39,81% do PIB total do estado de Goiás. Portanto, a agropecuária goiana é altamente expressiva com posição entre os maiores produtores do país, tendo impacto direto nos demais setores da economia (Goiás, 2023a).

Segundo dados do Instituto Mauro Borges (2020), os grandes destaques no setor industrial foram nas atividades de alimentos, bebidas, automobilística, fabricação de medicamentos, beneficiamento de minérios e na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, sendo que o expressivo resultado se deve à evolução do agronegócio goiano, do comércio e ao crescimento e diversificação do setor industrial.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte destacam-se os municípios de Goiânia, Caldas Novas e Rio Quente, como principais destinos turísticos urbanos para gastronomia, arquitetura, bares e turismo de negócios. Em Goiânia, o polo de moda e o turismo patrimonial também atraem pessoas de todo o país. Assim como os centros urbanos aliados a proximidade de patrimônios culturais, tais como os centros histórico de Corumbá de Goiás, Trindade, Cidade de Goiás e Pirenópolis (Goiás, 2023a).

3.3 ANÁLISE DAS SÉRIES HIDROLÓGICAS

Na busca por dados para estudos hidrológicos, os mesmos nem sempre estão disponíveis. Neste estudo não foi diferente a aquisição dos dados, pois foram encontradas no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de

Águas e Saneamento (ANA) mais de 30 estações fluviométricas e pluviométricas. Porém, a maioria das estações não possuía séries disponíveis, ou quando disponíveis, apresentavam quantidade insuficiente e com muitas falhas. Pois segundo Naghettini e Pinto (2007) as séries de dados para análises estatísticas, como a de frequências, devem ser representativas da variável em questão, contendo quantidade suficiente de elementos que permita realizar extrapolações confiáveis e não apresentando erros de observação. Sendo consideradas representativas para este estudo de vazões, séries com um mínimo de 30 anos.

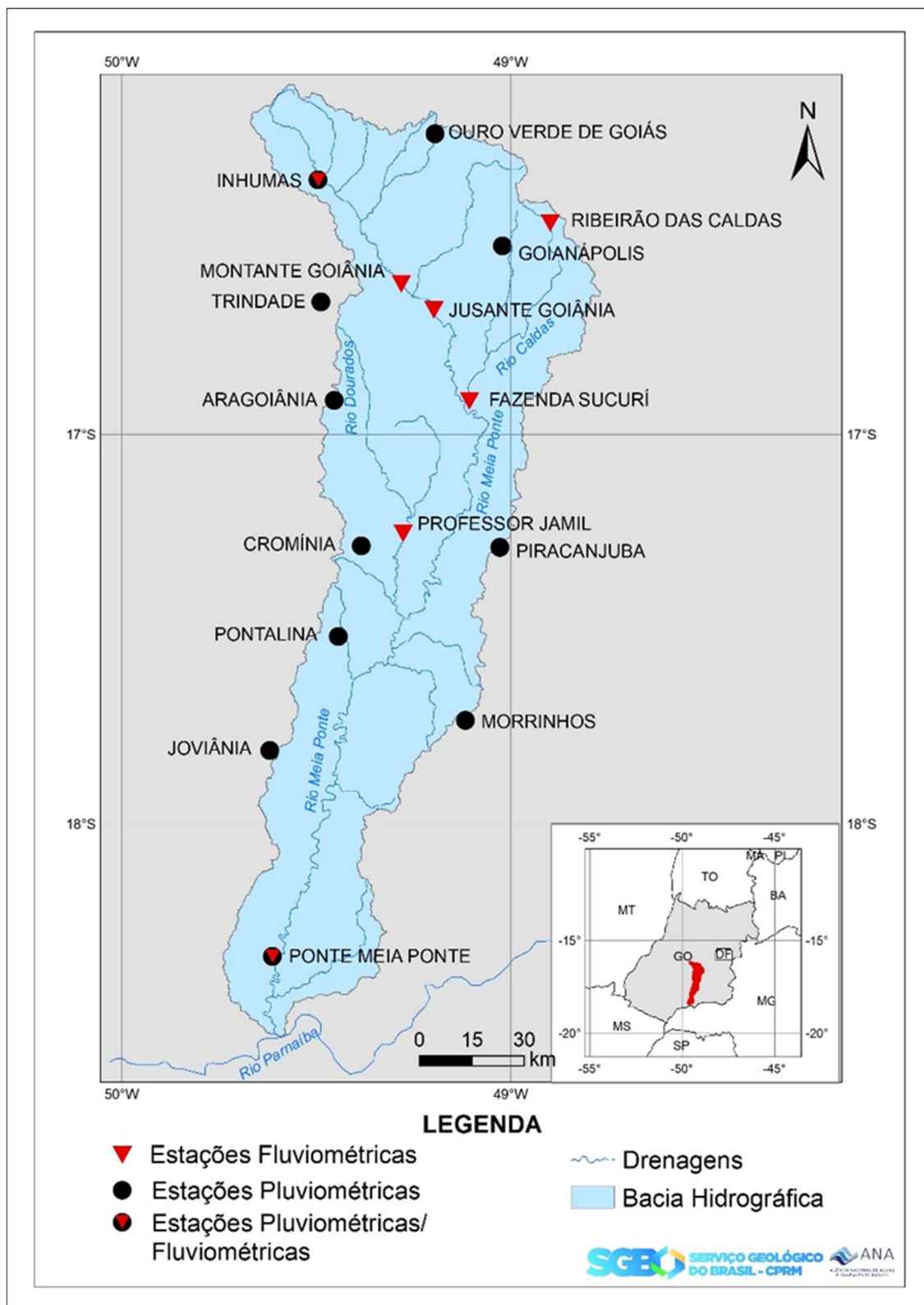
Logo, para a verificação do comportamento das vazões mínimas ao longo dos anos na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte foram selecionadas sete estações fluviométricas e onze estações pluviométricas localizadas na bacia e pertencentes a Rede Hidrometeorológica Nacional, com mais de 30 anos de dados e poucas falhas, obtidas dos bancos de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Serviço Geológico do Brasil (SGB).

As séries de precipitações e vazões foram montadas, em seguida realizada uma análise de consistência para verificação de possíveis erros. Sendo preenchidas as falhas a nível diário ou mensal, quando possível, por interpolação usando média ou mediana. Foram utilizadas no preenchimento de falhas de vazões, estações de apoio vizinhas, situadas ou não no mesmo rio. E no preenchimento de falhas de precipitações foram utilizadas estações de apoio vizinhas dentro da bacia e também estações localizadas fora da área da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, pertencentes a Rede Hidrometeorológica Nacional e climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A Figura 13 mostra a localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para o estudo. E os Quadros 4 e 5 mostram os dados dessas estações. O Quadro 6 mostra as estações pluviométricas utilizadas como apoio.

Para as análises estatísticas, os cálculos dos índices de seca e a modelagem hidrológica, os dados das estações pluviométricas, fluviométricas e climatológicas foram montados em formato de colunas. E preparadas as séries de acordo com cada análise, em dia, mês e ano, para uso no programa Rstudio.

Figura 13 - Localização das estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas



Fonte: a autora.

Quadro 4 - Dados das estações fluviométricas selecionadas para o estudo

Estações fluviométricas					
Nome	Código ANA	Rio	Área de drenagem (km ²)	Período dos dados	Quantidade de anos
Inhumas	60635000	Rio Meia Ponte	532	1947-2023	75
Montante de Goiânia	60640000	Rio Meia Ponte	1740	1975-2023	47
Jusante de Goiânia	60650000	Rio Meia Ponte	2830	1978-2023	44
Ribeirão das Caldas	60653000	Rio das Caldas	51,0	1978-2023	44
Fazenda Sucuri	60654000	Rio das Caldas	1290	1979-2023	43
Professor Jamil	60665000	Rio Dourados	1250	1978-2023	44
Ponte Meia Ponte	60680000	Rio Meia Ponte	11500	1951-2023	71

Fonte: a autora.

Quadro 5 - Dados das estações pluviométricas selecionadas para o estudo

Estações Pluviométricas			
Nome	Código ANA	Período dos dados	Quantidade de anos
Aragoiânia	01649001	1974-2022	49
Goianópolis	01649004	1974-2022	49
Inhumas	01649006	1948-2022	75
Ouro Verde	01649009	1974-2022	49
Trindade	01649012	1974-2022	49
Joviânia	01749002	1974-2022	49
Morrinhos	01749003	1974-2022	49
Pontalina	01749004	1974-2022	49
Piracanjuba	01749005	1974-2022	49
Cromínia	01749009	1974-2022	49
Ponte Meia Ponte	01849016	1972-2022	51

Fonte: a autora.

Quadro 6 - Dados das estações pluviométricas de apoio

Estações Pluviométricas			
Nome	Código ANA	Período dos dados	Quantidade de anos
Anicuns	01649000	1971-2022	51
Itaberai	01649007	1973-2021	49
Goiânia - SUREG/GO	01649022	2012-2022	21
Cristianópolis	01748000	1973-2012	40
Fazenda Papua	01748002	1967-1988	22
Marzagão	01748004	1973-2012	40
UHE Itumbiara Jusante Ponte GO-213	01748017	2000-2007	8
Edéia (Alegrete)	01749000	1973-2006	34
Fazenda Boa Vista	01749001	1971-2006	36
Capinópolis	01849017	1970-2014	45
Estações Climatológicas			
Nome	Código INMET	Período dos dados	Quantidade de anos
Goianésia	83350	1984-2008	25
Fazenda Capivara (Goianira)	83422	1986-1997	12
Goiânia	83423	1961-2022	62
Ipameri	83522	1977-2023	47
Itumbiara	83523	1989-2012	23
Catalão	83526	1948-2023	76

Fonte: a autora.

3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS HIDROLÓGICOS

A seguir são apresentados os testes estatísticos aplicados às vazões mínimas e às precipitações, verificando as frequências de ocorrências dessas variáveis na Bacia do Rio Meia Ponte.

3.4.1 Análises estatísticas às vazões mínimas

As séries de vazões das sete estações das selecionadas foram montadas por ano hidrológico e por ano civil, sendo calculadas as vazões mínimas médias de 7 dias, de 90 dias (trimestre mais seco) e de 180 dias (semestre mais seco), utilizando o programa Rstudio e planilhas do programa EXCEL. Considerando que o ano hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte inicia em outubro e termina em setembro. Para os cálculos do trimestre mais seco foram adotados os meses de junho a agosto, e para o semestre mais seco os meses de maio a outubro.

As etapas para análise de frequência podem ser assim resumidas:

- Montagem de séries anuais;
- Avaliação das séries quanto aos atributos de estacionariedade, homogeneidade, independência e representatividade, aplicando testes de hipóteses;
- Propor algumas distribuições teóricas de probabilidade, realizando a estimativa dos respectivos parâmetros e quantis, com intervalos de confiança;
- Aplicação dos testes de aderência à distribuição empírica;
- Seleção do modelo distributivo mais adequado.

Nesses procedimentos são utilizados métodos para a construção de papéis de probabilidade e para estimativa das probabilidades de eventos observados (Naghetini; Pinto, 2007).

Foram realizados os testes quanto aos atributos de independência, homogeneidade e estacionariedade, utilizando planilhas do programa EXCEL, para cada estação, montadas com as séries em ordem cronológica (crescente) e com as equações descritas conforme Naghetini e Pinto (2007).

Para o teste de independência as planilhas foram montadas com as equações do teste não paramétrico proposto por Wald e Wolfowitz (1943), conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste dada pela equação (6), a média pela equação (7) e a variância pela equação (8).

A estatística do teste pode ser formulada pela equação (10), sendo realizados testes a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

Para o teste de homogeneidade as planilhas foram montadas com as equações do teste não-paramétrico proposto por Mann e Whitney (1947), conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste dada pelo menor valor entre os resultados das equações (11) e (12). A média calculada pela equação (13) e a variância pela equação (14).

A estatística do teste pode ser formulada pela equação (15), sendo realizados testes a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

E para o teste de estacionariedade as planilhas foram montadas com as equações do teste não-paramétrico proposto por Spearman, conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste como base o coeficiente da equação (16), a média calculada pela equação (17) e a variância pela equação (18).

A estatística do teste pode ser formulada pela equação (19), sendo realizados testes a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

Para estimativa da distribuição empírica foi realizada ordenação crescente da série e o cálculo da posição de plotagem pela fórmula de Weibull, equação (36).

Na definição da distribuição teórica de probabilidade as candidatas foram Gumbel e Weibull, sendo as mais indicadas em estudos com vazões mínimas.

Os parâmetros das distribuições teóricas de probabilidades candidatas foram calculados pelo método dos momentos-L, definidos pelas equações (26) e (27) apresentadas no item 2.4.3. Sendo os momentos-L de ordem r , denotados por λ_r , combinações lineares dos MPP's α_s e β_r , no caso da distribuição Gumbel:

$$\alpha = \frac{l_2}{\ln(2)} \quad (52)$$

$$\beta = l_1 + 0,5772 \alpha \quad (53)$$

$$\text{O coeficiente } \tau, \text{ dado por } \tau = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (54)$$

$$\text{Os coeficientes } \tau_3 \text{ e } \tau_4 \text{ por } \tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \quad (55)$$

$$\text{E } \tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \quad (56)$$

E a definição da distribuição teórica adotada na modelagem das séries a partir da verificação da aderência à distribuição empírica foi realizada pelos testes: Kolmogorov-

Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) e Qui². Sendo a estatística do teste Qui² calculada pela equação (20), a estatística do teste KS dada pela equação (21) e a estatística do teste AD calculada pela equação (22), apresentadas no item 2.4.2.

Selecionou-se então o modelo distributivo mais apropriado a cada uma das sete estações selecionadas para o estudo da Bacia do Rio Meia Ponte, verificando o ajuste visual da distribuição empírica (série de vazões ordenada) à cada distribuição teórica candidata, plotadas em um papel de probabilidades.

Em seguida pode-se estimar os quantis associados a diferentes tempos de retorno.

Para a distribuição de Gumbel para mínimos, estimados os parâmetros, os quantis foram estimados pela equação:

$$x(T) = \beta + \alpha \ln [-\ln (1 - (1/T))] \quad (57)$$

Para a distribuição de Weibull 2 parâmetros para mínimos, estimados os parâmetros, os quantis foram estimados pela equação:

$$x(T) = \beta [-\ln (1 - (1/T))]^{1/\alpha} \quad (58)$$

Para a distribuição de Weibull 3 parâmetros para mínimos, estimados os parâmetros, os quantis foram estimados pela equação:

$$x(T) = \xi + (\beta - \xi) [-\ln (1 - (1/T))]^{1/\alpha} \quad (59)$$

Sendo um dado importante para estudos com vazões mínimas, foi estimada a vazão mínima média com duração de sete dias associada ao período de retorno de 10 anos (Q_{7,10}), vazão de referência utilizada em outorgas do uso da água em mananciais de alguns estados.

3.4.2 Análises estatísticas às precipitações

As séries de precipitações das estações também foram montadas por ano hidrológico e por ano civil, sendo calculados os valores totais anuais, do trimestre mais seco (90 dias) e do semestre mais seco (180 dias), utilizando o programa Rstudio e planilhas do programa EXCEL. Considerando que o ano hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, para as chuvas inicia em setembro e termina em agosto. E para os cálculos do trimestre mais seco foram adotados os meses de junho a agosto, e para o semestre mais seco os meses de maio a outubro.

Durante a preparação das séries para aplicação dos testes estatísticos, os dados da estação Piracanjuba (código ANA 01749005) foram considerados duvidosos, por seguirem tendência muito diferente das demais, sendo retirada do estudo. Por outro lado, os dados da estação Goiânia (código INMET 83423), que era estação de apoio, foram utilizados nos testes estatísticos, na modelagem das vazões e nos cálculos dos índices de seca deste estudo, sendo considerados excelentes.

Da mesma forma que as vazões, para as séries de precipitações foram realizados os testes de homogeneidade, independência e estacionariedade, utilizando planilhas do programa EXCEL, para cada estação, montadas com as séries em ordem cronológica (crescente) e com as equações descritas conforme Naghettini e Pinto (2007, p. 264-267).

Para o teste de independência as planilhas foram montadas com as equações do teste não-paramétrico proposto por Wald e Wolfowitz (1943), conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste dada pela equação (6), a média pela equação (7) e a variância pela equação (8). E pode ser formulada pela equação (10), a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

Para o teste de homogeneidade as planilhas foram montadas com as equações do teste não-paramétrico proposto por Mann e Whitney (1947), conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste dada pelo menor valor entre os resultados das equações (11) e (12). A média calculada pela equação (13) e a variância pela equação (14). A estatística do teste pode ser formulada pela equação (15), a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

Para o teste de estacionariedade as planilhas foram montadas com as equações do teste não-paramétrico proposto por Spearman, conforme apresentado no item 2.4.2. Sendo a estatística do teste como base o coeficiente da equação (16), a média calculada pela equação (17) e a variância pela equação (18). A estatística do teste pode ser formulada pela equação (19), a nível de significância α : 0,05, 0,025 e 0,015.

E a verificação da aderência pelos testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Qui^2 , utilizando as mesmas equações: sendo a estatística do teste Qui^2 calculada pela equação (20), a estatística do teste KS dada pela equação (21) e a estatística do teste AD calculada pela equação (22), conforme apresentado no item 2.4.2.

Foram testadas as distribuições teóricas de probabilidades: logística, Pareto, GEV, Gama, Gumbel e Exponencial. Sendo os respectivos parâmetros das distribuições calculados

pelo método dos momentos-L, definidos pelas equações (26) e (27), apresentadas no item 2.4.3.

Selecionou-se então o modelo distributivo mais apropriado a cada uma das onze estações selecionadas para o estudo da Bacia do Rio Meia Ponte, verificando o ajuste visual da distribuição empírica (série de vazões ordenada) à cada distribuição teórica candidata, plotadas em um papel de probabilidades.

Em seguida pode-se estimar os quantis associados a diferentes tempos de retorno.

Todas as análises foram realizadas conforme Naghettini e Pinto (2007), da mesma forma que com as vazões.

3.5. O MODELO HIDROLÓGICO APLICADO

Neste estudo foram simuladas as vazões para as estações selecionadas, com o modelo hidrológico oficial HYMOD, que relaciona chuva-vazão em uma bacia hidrográfica, sendo um modelo concentrado, escolhido por ser simples e com poucos parâmetros.

Para a simulação das vazões diárias, foram montadas planilhas Excel para cada estação, com os dados no formato de colunas: data, precipitação média diária, evapotranspiração e a vazão observada, todas em milímetros (mm).

As vazões da estação Ponte Meia Ponte, localizada próximo a foz da bacia com o rio Paranaíba, representam as vazões de toda a Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte. Portanto, essa estação foi utilizada para obtenção dos parâmetros do modelo, na etapa de calibração.

As séries pluviométricas médias diárias utilizadas na simulação das vazões da estação Ponte Meia Ponte foram as mesmas calculadas para obtenção do total médio da bacia, pelo método de Thiessen. Obtendo-se uma série pluviométrica média diária.

Para a simulação das vazões das demais estações, foram utilizadas séries pluviométricas médias diárias com as estações respectivas, de acordo com a área de influência em cada estação pluviométrica. As séries evaporimétricas utilizadas nas simulações das vazões de todas as estações foram da estação climatológica Goiânia (INMET).

Para que fosse possível a obtenção de parâmetros do modelo, que pudessem representar todo o período em estudo, a série de dados foi dividida em partes ou períodos:

- Período I - setembro/1974 a agosto/1984 (10 anos) para a etapa de calibração.
- Período II – setembro/1984 a agosto/1994 (10 anos) para a etapa de validação.
- Período III – setembro/1994 a agosto/2023 (20 anos) para a etapa de análise.

Na etapa de calibração do modelo, foram adotados valores iniciais para os parâmetros, em seguida processando os valores, com as funções do modelo em planilha do programa Excel, realizando cálculos utilizando o método automático do módulo solver, com funções objetivo considerando o algoritmo Evolucionary, em seguida otimizando com algoritmo GRG Não linear, para encontrar a melhor combinação, visando uma maior eficiência do modelo.

Após os cálculos das vazões simuladas na calibração, foi aplicado um teste de eficiência do modelo, considerando o semestre mais seco (maio a outubro), utilizando o coeficiente NSE (Nash e Sutcliffe, 1970), conforme a equação a seguir:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N [Q_{obs(t)} - Q_{cal(t)}]^2}{\sum_{t=1}^N [Q_{obs(t)} - Q_{medio}]^2} \quad (60)$$

Onde: NSE = eficiência de Nash-Sutcliffe; Q_{obs} = vazão observada; Q_{cal} = vazão calculada pelo modelo; Q_{medio} = média das vazões observadas e N = número de observações.

O teste de eficiência foi aplicado após sucessivas otimizações dos parâmetros do modelo com os algoritmos, até obtenção do resultado satisfatório, com valores do coeficiente NSE maiores que 0,70, segundo Schaepli e Gupta (2007).

Em seguida, foram aplicados os valores dos parâmetros obtidos na calibração do modelo nas etapas de validação (10 anos) e de análise (20 anos), para os respectivos períodos, realizando o teste de eficiência com NSE, verificando se os valores obtidos em cada etapa eram maiores que 0,70.

Foram então simuladas as vazões para as demais estações, utilizando os mesmos parâmetros obtidos para o modelo com os dados da estação Ponte Meia Ponte, aos períodos da etapa de análise: setembro/1994 a agosto/2023 (20 anos) de cada estação.

Sendo aplicado o mesmo teste de eficiência do modelo, utilizando o coeficiente NSE, também considerando o semestre mais seco, dos períodos de análise das estações.

3.6. OS ÍNDICES DE SECA APLICADOS

Neste estudo foram utilizados para avaliação das secas três índices: Standardized Precipitation Index (SPI) - índice padronizado de precipitação, Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) - índice Padronizado de Evapotranspiração da Precipitação e o Standardized Streamflow Index (SSI) - índice de fluxo padronizado.

Para o cálculo do SPI foram preparadas as séries históricas de precipitação das onze estações pluviométricas selecionadas, no formato ano-mês-chuva em colunas, para entrada nos programas da WMO (2012) e Rstudio (script com a ferramenta SPEI). Foram obtidos valores mensais do SPI, calculados pelas equações (48) e (49), apresentadas no item 2.6.1, nas escalas de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, sendo gerados gráficos para cada escala.

Da mesma forma, para o cálculo do SSI foram organizados os dados de vazão observada das sete estações selecionadas, no formato ano-mês-vazão em colunas, para entrada no programa da WMO (2012) e Rstudio (script com a ferramenta SPEI), onde foram obtidos os valores mensais do SSI, calculados pelas equações (48) e (49), apresentadas no item 2.6.1, nas escalas de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses e gerados gráficos correspondentes. Após a simulação das vazões com o modelo hidrológico HYMOD, foram calculados novamente os índices de seca SSI, com as vazões simuladas das sete estações em estudo, com as mesmas equações e nas mesmas, gerando os gráficos correspondentes.

Para o cálculo do SPEI, foi necessário calcular a evapotranspiração utilizando os dados de temperatura da estação Goiânia (INMET), no programa Rstudio, pelo método de Thornthwaite. Os dados da evapotranspiração foram organizados em planilhas, com os dados de precipitação da estação, e calculados os déficits (precipitação - evapotranspiração) para entrada no programa Rstudio (script com a ferramenta SPEI). Os valores do SPEI foram calculados pelas equações (48) e (49), apresentadas no item 2.6.1, nas escalas de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, e gerados gráficos para cada escala.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DO USO DO SOLO / ÁGUA

Os resultados deste estudo mostraram que ocorreram muitas alterações nos usos do solo e da água na Bacia do Rio Meia Ponte ao longo dos anos, devido ao aumento das áreas urbanizadas (em torno de Goiânia), da industrialização e das retiradas para a agricultura irrigada, com redução da vegetação nativa.

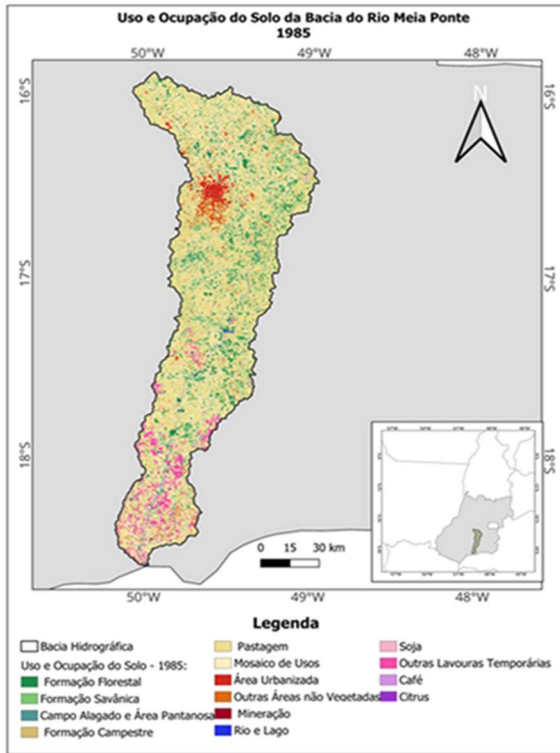
Estudos apresentaram uma evolução temporal do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte, no período de 1988 a 2018, onde concluíram que as áreas naturais na bacia sofreram uma redução considerável, enquanto áreas antrópicas obtiveram um alto crescimento. Isto devido ao crescimento econômico e demográfico apresentados pela análise socioeconômica e a evolução histórica da cobertura e uso do solo. Os principais resultados mostraram aumento da agropecuária, totalizando 61,2% de sua área, e aumento da área urbana e industrial, até o ano de 2018. E que em 1988 a agropecuária já possuía grande ocupação, com redução das Áreas de Preservação Permanente – APP's (Borges; Oliveira, 2021).

A Figura 14 mostra os mapas de uso e ocupação do solo referentes aos anos 1985, 1995, 2005, 2015 e 2022, onde pode-se observar o aumento das áreas antropizadas ao longo dos anos: das áreas urbanizadas, em torno da capital Goiânia, e das áreas com agricultura, situadas ao sul da bacia.

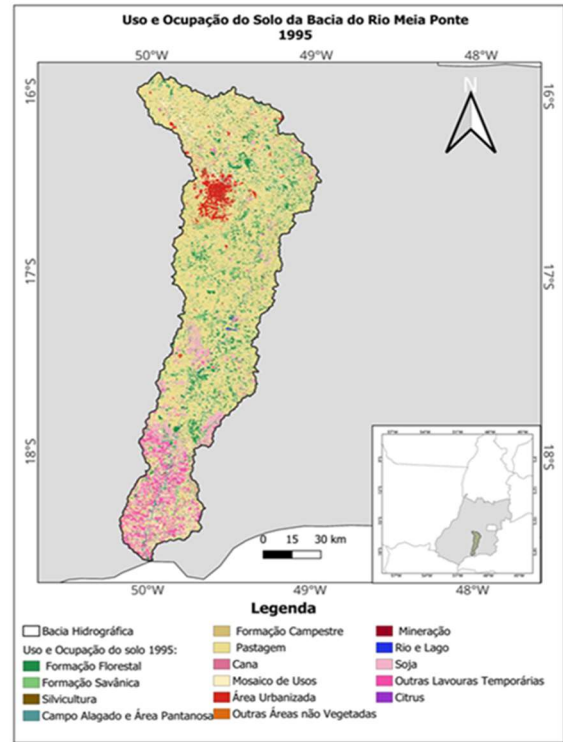
Na Figura 15 são mostradas as porcentagens de ocupação das áreas por classe, onde percebe-se a grande porcentagem ocupada pela agropecuária na bacia do Rio Meia Ponte, em relação às demais classes.

No Quadro 7 são mostradas as áreas ocupadas por classe em hectare (ha), no período de 1985 a 2022, e na Figura 16 um gráfico com o crescimento das áreas por classe, em hectare (ha), no período de 1985 a 2022, destacando-se as grandes áreas com pastagens e agricultura (MapBiomias, 2023b).

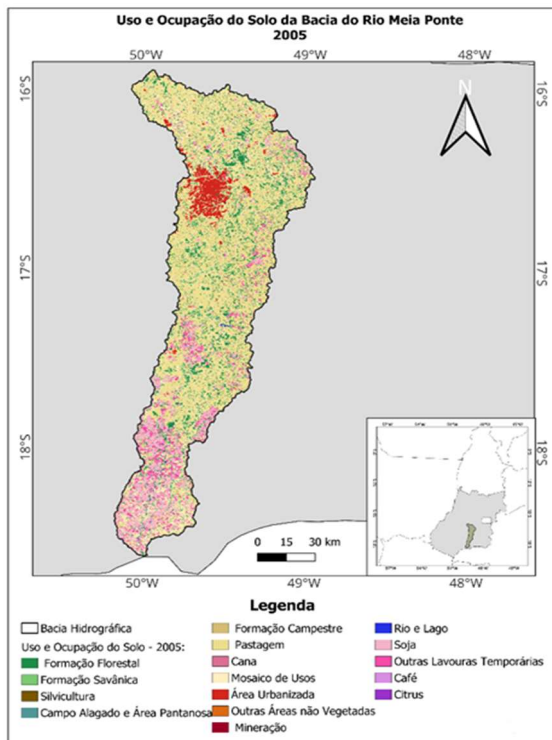
Figura 14 - Uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Meia Ponte nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2022



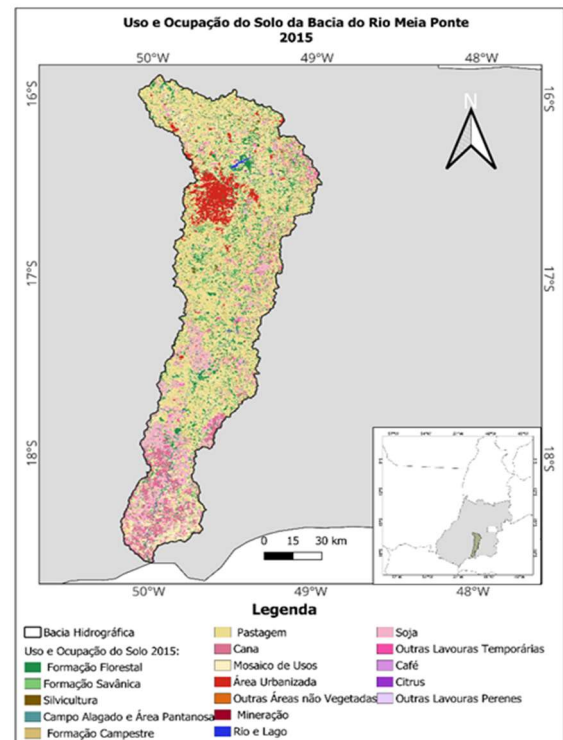
(a) 1985



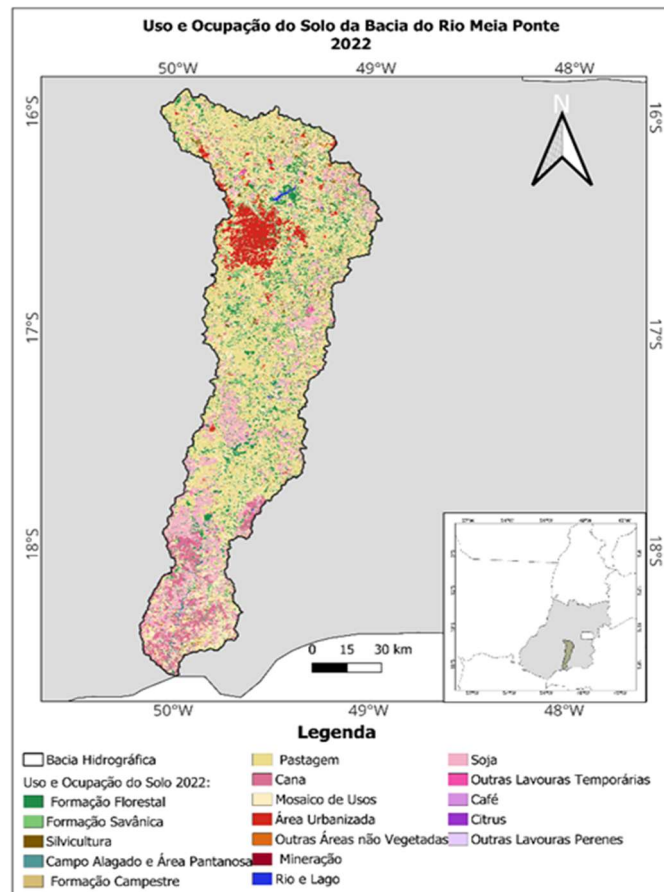
(b) 1995



(c) 2005



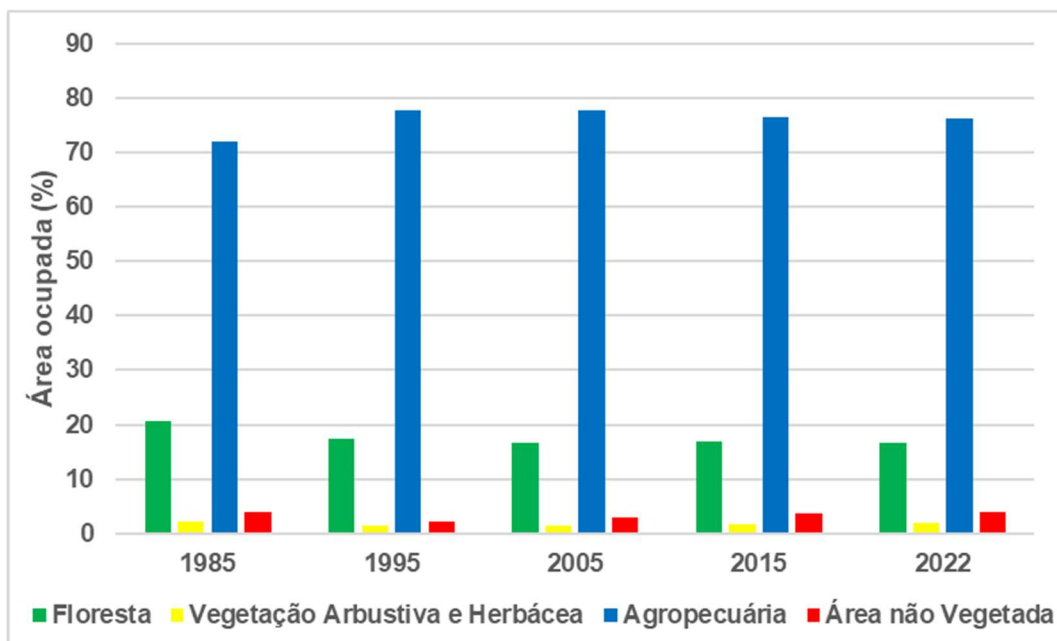
(d) 2015



(e) 2022

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2023b).

Figura 15 - Área ocupada por classe (%) na Bacia do Rio Meia Ponte (1985-2022)



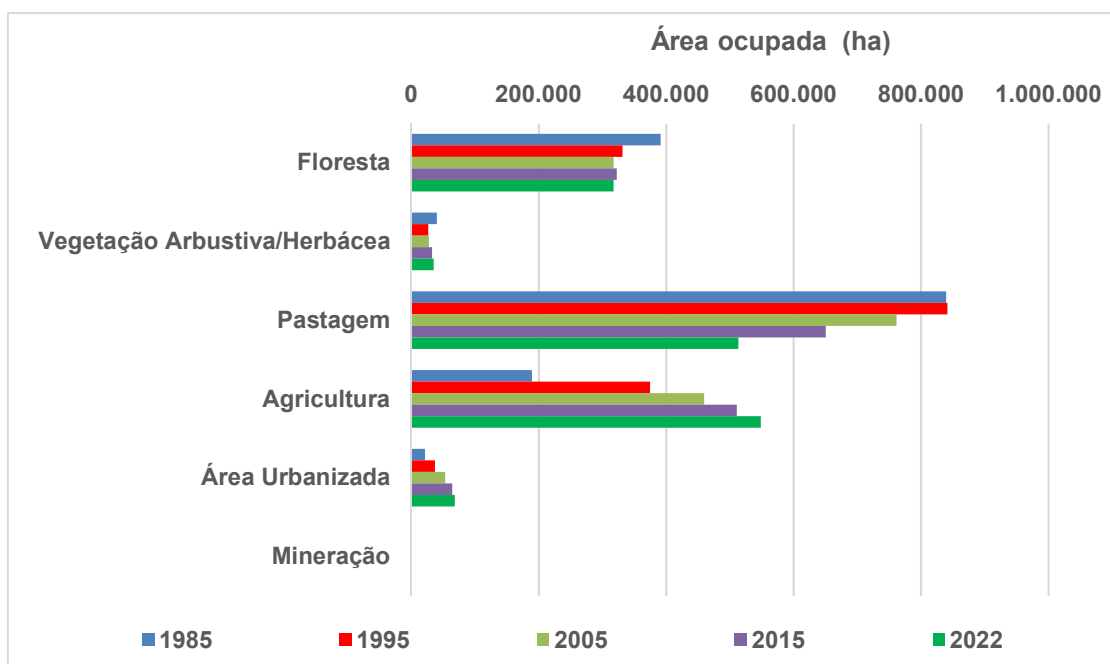
Fonte: Adaptado de MapBiomias (2023b)

Quadro 7 - Áreas ocupadas por classe (ha) na Bacia do Rio Meia Ponte - 1985 a 2022

Classe	Área ocupada (ha)				
	1985	1995	2005	2015	2022
1. Floresta	391.597	331.855	317.499	322.534	317.372
2. Vegetação Arbustiva e Herbácea	40.079	26.829	27.650	32.668	35.432
3. Agropecuária	1.372.519	1.479.087	1.481.650	1.458.992	1.454.789
3.1. Pastagem	839.723	841.443	761.650	650.564	513.561
3.2. Agricultura	189.293	374.986	459.750	511.118	548.821
4. Área não Vegetada	75.782	41.776	55.344	68.036	73.557
4.2. Área Urbanizada	21.733	37.010	53.090	64.303	68.545
4.3. Mineração	63	131	241	294	304

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2023b)

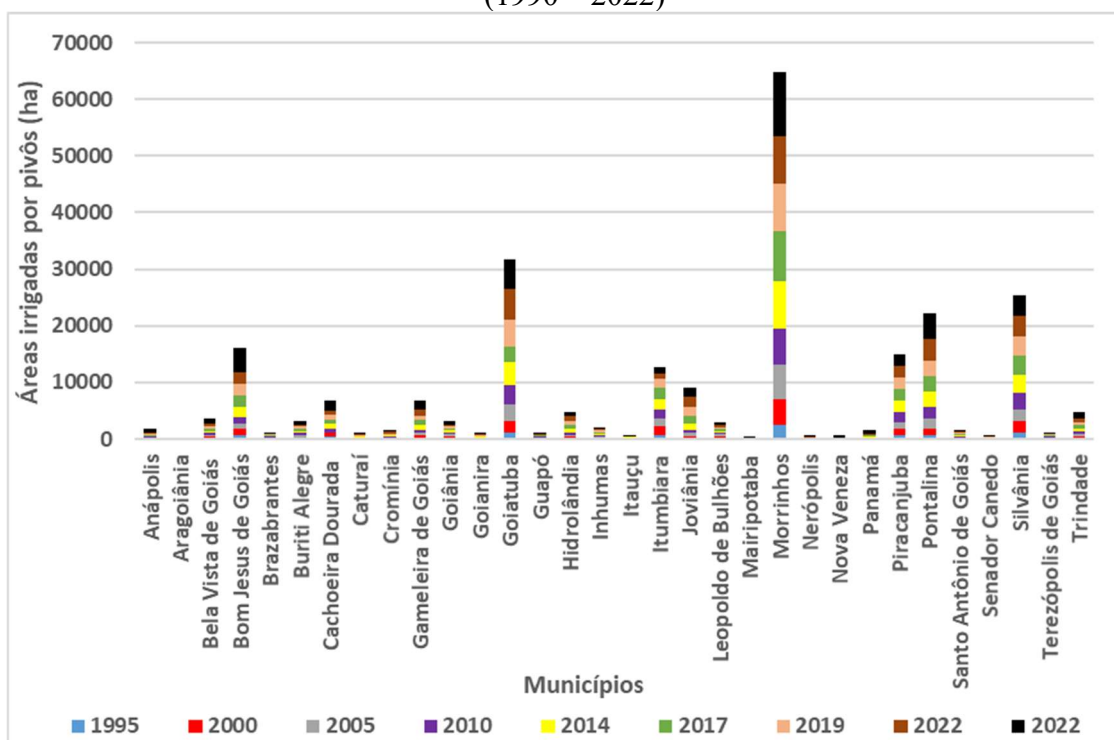
Figura 16 - Crescimento das áreas ocupadas por classe (ha) na Bacia do Rio Meia Ponte (1985 – 2022)



Fonte: Adaptado de MapBiomias (2023b)

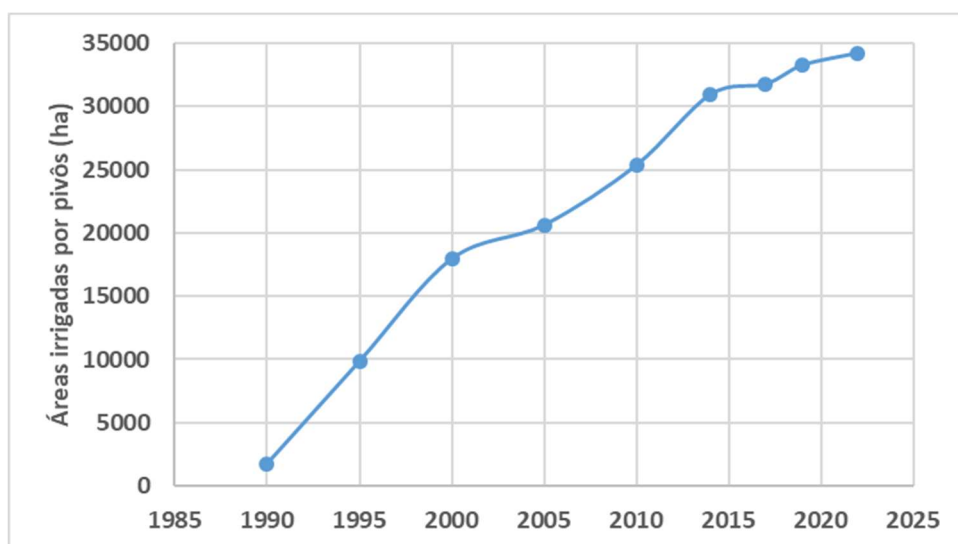
Tais aumentos nas áreas com agricultura são mostrados também na Figura 17, com as áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte, por município, no período de 1995 a 2022 e na Figura 18, com o total das áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte, no período de 1990 a 2022. Sendo um crescimento de mais de 10.000 ha entre os anos de 2005 e 2015, na bacia.

Figura 17 - Áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte por município (1990 – 2022)



Fonte: Adaptado de ANA. Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada, 2021 / Monitoramento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil.

Figura 18 - Áreas irrigadas por pivô central na Bacia do Rio Meia Ponte (1990 – 2022)

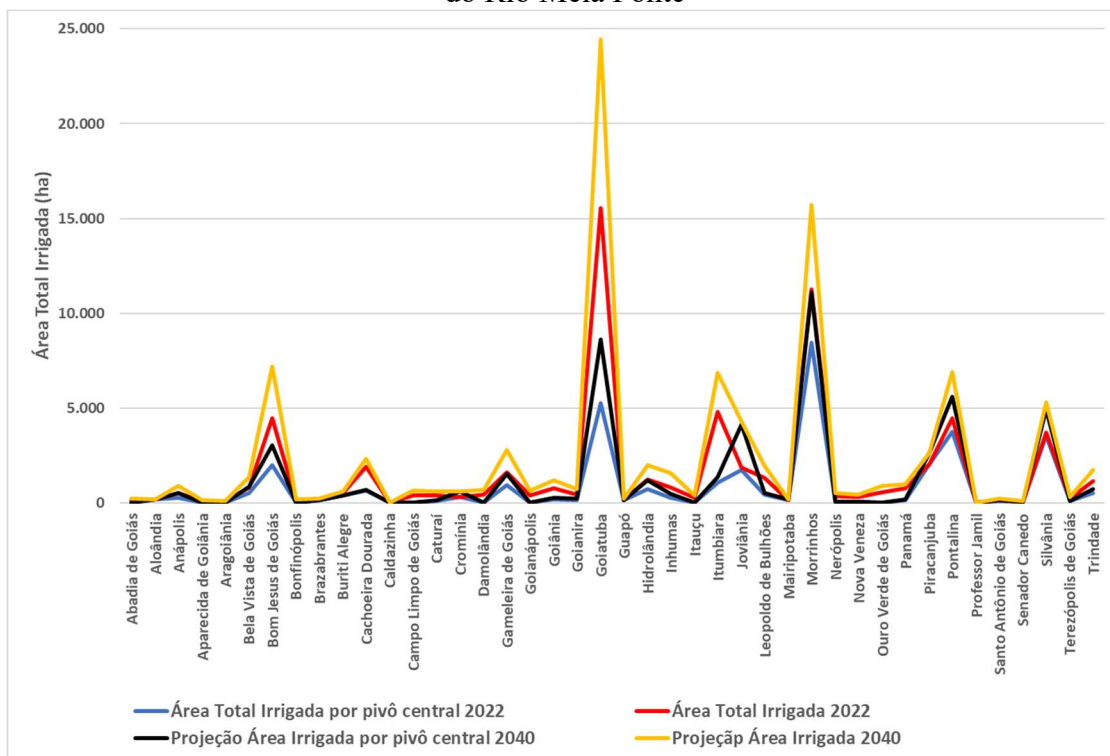


Fonte: Adaptado de ANA. Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada, 2021 / Monitoramento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil.

E a Figura 19 mostra um gráfico de comparação entre as áreas totais irrigadas por pivô central e as áreas totais irrigadas em 2022, bem como uma projeção dessas áreas para

2040, por município, na Bacia do Rio Meia Ponte. Demonstrando o quanto as retiradas de água dos mananciais na bacia poderão crescer até 2040.

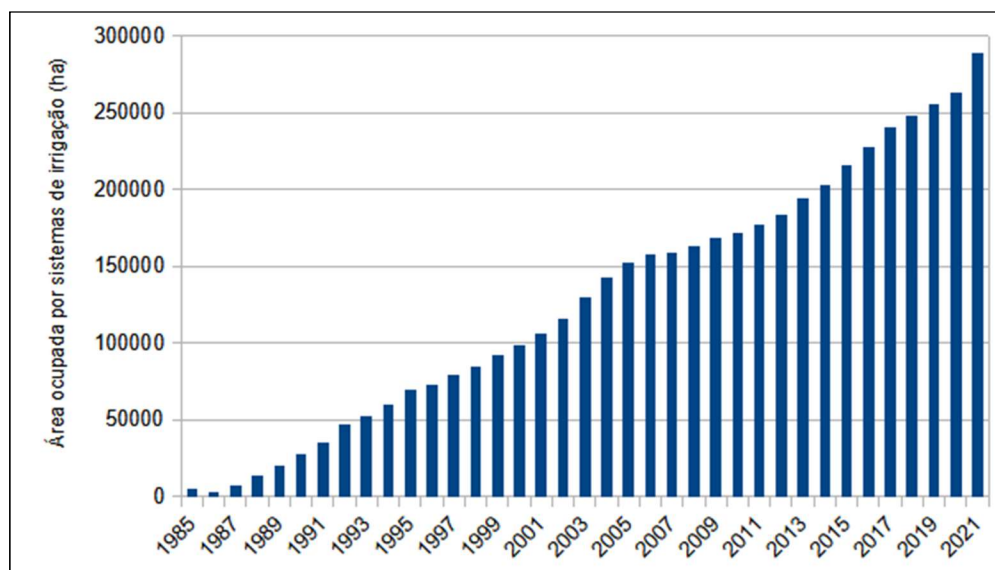
Figura 19 - Área totais irrigadas em 2022 e projeção para 2040 por município na Bacia do Rio Meia Ponte



Fonte: Adaptado de ANA. Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada, 2021 / Monitoramento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil.

Uma tendência do estado de Goiás, mostrada na Figura 20, com o crescimento das áreas ocupadas por sistemas de irrigação em Goiás, no período de 1985 a 2021.

Figura 20 - Área ocupada por sistemas de irrigação em Goiás (1985-2021)



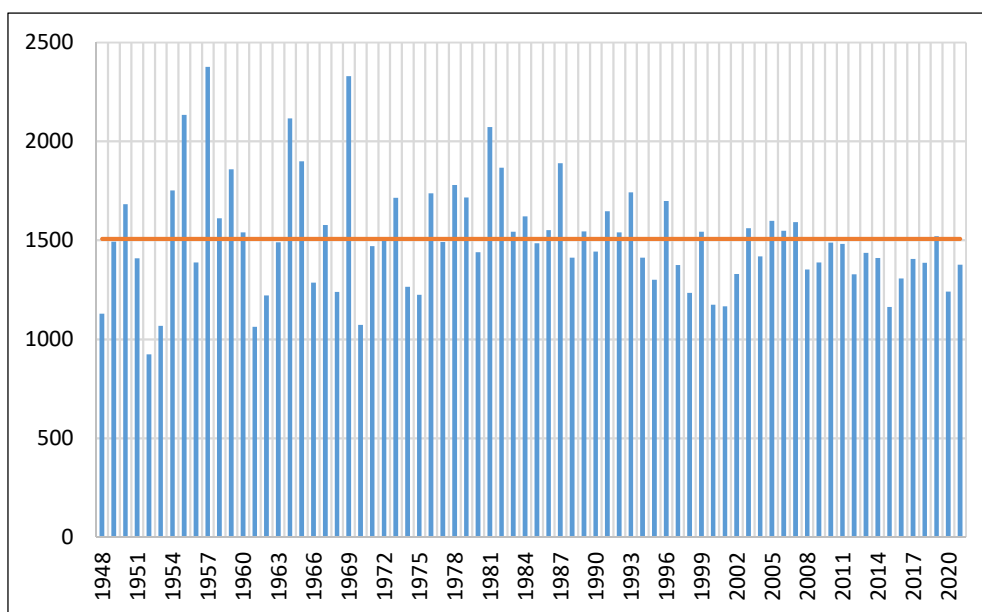
Fonte: Adaptado de Projeto MapBiomass (2023c).

Considerando que na agricultura irrigada são retiradas grandes quantidades de água dos corpos hídricos, pode-se entender que essas atividades impactaram fortemente os recursos hídricos na Bacia do Rio Meia Ponte, podendo ser a causa da diminuição nas vazões ao longo do tempo.

4.2 ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES E DO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA

As precipitações na Bacia do Rio Meia Ponte sofreram redução nas últimas décadas, como mostra a Figura 21, com as precipitações totais anuais médias, no período de 1948 a 2020. Onde pode-se observar que nos últimos anos, período de 2008 a 2022, os valores médios precipitados ficaram abaixo dos 1523 mm, valor médio da bacia. E a oscilação normal entre anos chuvosos e secos reduziu, demonstrando alterações no regime de chuvas da bacia.

Figura 21 - Precipitações totais anuais médias na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte



Fonte: a autora.

Para verificar as frequências de ocorrências da variável precipitação na bacia, foram realizadas análises estatísticas, sendo apresentadas a seguir.

4.2.1 Análises estatísticas aos dados de precipitação

Para as análises estatísticas, foram montadas as séries de totais anuais precipitados das estações selecionadas e a estação Goiânia, por ano hidrológico. Sendo feitos os testes estatísticos: de independência (Wald; Wolfowitz, 1943), de homogeneidade (Mann; Whitney, 1947) e de estacionariedade de Spearman, com nível de significância de 0,05.

Nos três testes a maioria das séries foram “rejeitadas”. Sendo então as séries montadas por ano civil, realizando os três testes novamente, com os valores totais anuais, também com durações de 90 dias (trimestre mais seco) e de 180 dias (semestre mais seco). Os resultados apresentaram melhora para a maioria das estações, sendo mostrados nos Quadros 8 a 18.

Para definição da distribuição teórica de probabilidades, foram testadas várias distribuições candidatas: Logística, Pareto, Gama, Gumbel, GEV e Exponencial, sendo calculados os respectivos parâmetros pelo método dos momentos-L (Hosking e Wallis, 1997). E para verificação da aderência à distribuição empírica, foram realizados os testes: Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD) e Qui² (X^2). Sendo mostrados os resultados dos testes nos Quadros 8 a 18, para cada estação.

Verificando o ajuste visual da distribuição empírica de cada estação (série de precipitações ordenada), nos gráficos das distribuições teóricas candidatas plotadas em um papel de probabilidades, foram retiradas vazões superiores, visualmente fora da tendência (“outliers” superiores). Sendo todas séries de totais anuais das estações melhor ajustadas à distribuição Gama, exceto a série da estação Goiânia que foi melhor ajustada à distribuição logística, mostradas nas Figuras 22 a 32. Para as séries com durações de 90 dias (trimestre mais seco) e de 180 dias não houve ajuste a nenhuma distribuição teórica.

Em seguida foram estimados os quantis associados a diferentes tempos de retorno, das séries de totais anuais para a distribuição ajustada a cada estação. Sendo mostrados os resultados no Quadro 19, para as séries de totais anuais.

Os resultados mostrando a não estacionariedade das séries de precipitações eram esperados, pois segundo Naghetini e Pinto (2007), em séries não estacionárias incluem tendências de saltos, relacionadas a alterações bruscas em uma bacia hidrográfica ou trecho fluvial, relacionados a flutuações climáticas de longo período, tal como ocorre nessa bacia.

Quadro 8 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Aragoiânia (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,832	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,540	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,591	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1525,6	214,5	L1	L2	t	t3	t4
		1525,550	122,237	0,080	-0,047	0,122
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		48,716		31,315		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,088	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,501	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		4,411	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,701	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,420	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,954	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
22,1	22,3	L1	L2	t	t3	t4
		22,055	12,041	0,546	0,311	0,091
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,789		27,948		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,089424	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,192115	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,847	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-4,020	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,624	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
218,2	81,6	L1	L2	t	t3	t4
		218,220	44,929	0,206	0,157	0,128
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama		7,219		7,219		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,048538	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,174435	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,233	4	9,488	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 9 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Goianópolis (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,776	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-0,040	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-0,452	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1541,8	232,9	L1	L2	t	t3	t4
		1541,797	127,533	0,083	0,040	0,219
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		45,714		33,727		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,122	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,423	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,122	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,279	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,280	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,816	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
21,5	26,1	L1	L2	t	t3	t4
		21,531	12,986	0,603	0,390	0,173
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,592		36,362		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,176026	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		2,214847	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,077	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,740	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,624	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
237,2	103,7	L1	L2	t	t3	t4
		237,243	54,209	0,228	0,233	0,158
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		5,815		40,797		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,112124	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,642	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,882443	4	9,4877	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 10 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Inhumas (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	2,678	Rejeitar H ₀ , Observações dependentes				
Homogeneidade	-3,465	Rejeitar H ₀ , Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,833	Rejeitar H ₀ , Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1303	256,1	L1	L2	t	t3	t4
		1303,014	145,637	0,112	-0,024	0,131
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η , θ)		25,003		52,114		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,054	0,157	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,403	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		12,936	6	12,592	Rejeitar H ₀	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,653	Não Rejeitar H ₀ , Observações Independentes				
Homogeneidade	-0,477	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	1,128	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
28,4	34,4	L1	L2	t	t3	t4
		28,434	17,919	0,630	0,377	0,083
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η , θ)		0,516		55,128		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,235385	0,157	Rejeitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,974792	6	12,5916	Aceitar H ₀	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,868	Não Rejeitar H ₀ , Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,200	Rejeitar H ₀ , Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,050	Rejeitar H ₀ , Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
216,9	110,4	L1	L2	t	t3	t4
		216,923	61,995	0,286	0,156	0,077
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η , θ)		3,626		59,824		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,048923	0,157	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,367	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		6,254177	6	12,5916	Aceitar H ₀	

Fonte: a autora

Quadro 11 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Ouro Verde (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,096	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,580	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,577	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1607	292,3	L1	L2	t	t3	t4
		1606,959	160,704	0,100	0,160	0,166
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		31,261		51,403		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,072	0,1943		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,423	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,498	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,358	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,240	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,045	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
20,9	24,5	L1	L2	t	t3	t4
		21,353	12,254	0,574	0,417	0,094
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,686		31,127		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,199959	0,1943		Rejeitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		2,894907	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,892	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,900	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,593	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
233,3	97,1	L1	L2	t	t3	t4
		233,253	56,117	0,241	0,031	0,064
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		5,222		44,669		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,085749	0,1943		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,422	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,529209	4	9,4877	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 12 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Trindade (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,629	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,760	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,807	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1436	406,9	L1	L2	t	t3	t4
		1436,000	223,987	0,156	0,028	0,186
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		12,747		112,649		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,066	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,356	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,453	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,491	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,440	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,229	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
23	25,2	L1	L2	t	t3	t4
		23,044	13,787	0,598	0,286	-0,006
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,606		38,008		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,256873	0,1943	Rejeitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		8,842768	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,798	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-3,860	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,752	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
204,1	107,8	L1	L2	t	t3	t4
		204,061	60,865	0,298	0,104	0,126
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		3,308		61,683		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,073339	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,400	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		1,408565	4	9,4877	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 13 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Joviânia (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	2,312	Rejeitar H ₀ , Observações dependentes				
Homogeneidade	-1,800	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,854	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1498,3	369,9	L1	L2	t	t3	t4
		1498,286	202,827	0,135	-0,047	0,201
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		16,991		88,181		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,103	0,1943	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,824	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,626	4	9,488	Aceitar H ₀	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-1,221	Não Rejeitar H ₀ , Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,520	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,821	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
26,8	27,7	L1	L2	t	t3	t4
		26,812	14,793	0,552	0,314	0,109
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,767		34,966		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,080807	0,1943	Rejeitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		2,646646	4	9,4877	Aceitar H ₀	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,964	Não Rejeitar H ₀ , Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,640	Rejeitar H ₀ , Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,313	Rejeitar H ₀ , Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
208,7	99,7	L1	L2	t	t3	t4
		208,682	57,005	0,273	0,065	0,104
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		3,993		52,258		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,068253	0,1943	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,591	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		1,276129	4	9,4877	Aceitar H ₀	

Fonte: a autora

Quadro 14 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Morrinhos (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,390	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,920	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,668	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
1465,9	223,8	L1	L2	t	t3	t4
		1465,899	128,303	0,088	0,033	0,097
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η, θ)		40,830		35,902		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,078	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,301	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,134	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,036	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,125	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,250	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
27,3	29,6	L1	L2	t	t3	t4
		27,770	14,869	0,535	0,383	0,116
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η, θ)		0,832		33,365		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,165006	0,1923	Rejeitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		2,524128	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,269	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,493	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,241	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
231,7	106,4	L1	L2	t	t3	t4
		231,703	58,793	0,254	0,168	0,157
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Gama (η, θ)		4,669		49,628		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,054827	0,1923	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,191	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		1,361512	4	9,4877	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 15 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Pontalina (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,934	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,800	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-2,393	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1367,7	279	L1	L2	t	t3	t4
		1367,673	159,751	0,117	0,015	0,110
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		22,882		59,771		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,048	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,207	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		1,644	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,706	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,950	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-2,189	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
21,8	24,3	L1	L2	t	t3	t4
		22,231	12,239	0,551	0,404	0,094
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,771		28,831		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,118637	0,1923	Rejeitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		10,30454	4	9,4877	Rejeitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,514	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,998	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-2,855	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
204,3	82,8	L1	L2	t	t3	t4
		204,340	45,519	0,223	0,182	0,138
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		6,131		33,327		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,109667	0,1923	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,436	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		14,58179	4	9,4877	Rejeitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 16 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Crominia (1974-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	1,772	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,120	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,724	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
1452,9	210,5	L1	L2	t	t3	t4
		1452,918	118,024	0,081	0,029	0,162
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		47,400		30,652		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,076	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,302	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		0,854	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,006	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,880	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,127	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
20,7	24,2	L1	L2	t	t3	t4
		20,742	12,126	0,585	0,339	0,148
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		0,649		31,946		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,238629	0,1943	Rejeitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		6,460912	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,048	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-2,400	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,082	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
197,9	76,8	L1	L2	t	t3	t4
		197,943	43,491	0,220	0,108	0,111
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		6,309		31,371		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,086838	0,1943	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,471	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		14,11081	4	9,4877	Rejeitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 17 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	0,212	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,507	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-2,243	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1416,9	248	L1	L2	t	t3	t4
		1416,876	139,799	0,099	0,015	0,164
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		32,117		44,115		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,073	0,1904		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,313	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,113	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,680	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,702	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-2,003	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
34,2	29,6	L1	L2	t	t3	t4
		34,233	16,036	0,468	0,244	0,124
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		1,177		29,069		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,07882	0,1886		Rejeitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
			0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,291502	4	9,4877	Aceitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	-0,398	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,903	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-2,407	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
226,6	89,9	L1	L2	t	t3	t4
		226,564	49,164	0,217	0,192	0,158
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Gama (η, θ)		6,474		34,994		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,07684	0,1886		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,288	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,836487	4	9,4877	Aceitar H0	

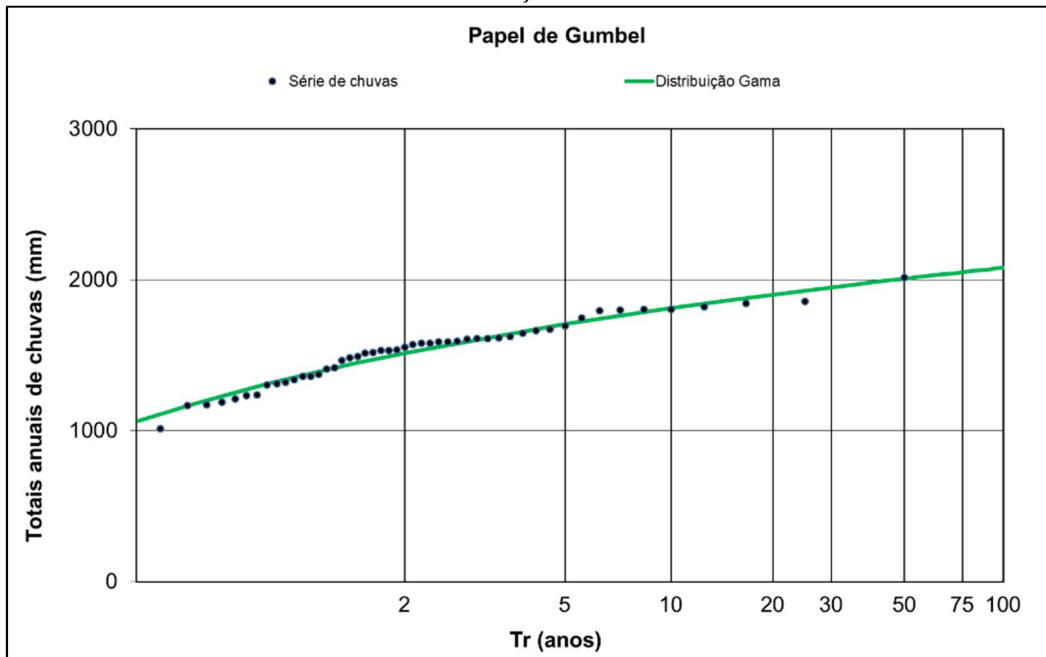
Fonte: a autora

Quadro 18 - Resultados dos testes estatísticos para precipitação total anual, trimestre mais seco e semestre mais seco da Estação Goiânia (1961-2022)

Precipitação total anual						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	0,992	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,556	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	1,427	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
1587,4	226,8	L1	L2	t	t3	t4
		1587,357	126,151	0,079	-0,078	0,175
Distribuição teórica ajustada		Localção	Escala	Forma		
Logística		1603,480	124,89	0,0779		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,046	0,1727	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,134	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,347	4	9,488	Aceitar H0	
Precipitação média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	0,911	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,288	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,032	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
23,1	25,2	L1	L2	t	t3	t4
		23,133	13,333	0,576	0,332	0,100
Distribuição teórica ajustada		Localção	Escala	Forma		
Gama (η, θ)		16,233	11,0405	-0,332232		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,130289	0,1727	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		1,431	0,752	Rejeitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		12,72654	4	9,4877	Rejeitar H0	
Precipitação média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	-0,049	Não Rejeitar H0, Observações Independentes				
Homogeneidade	-1,654	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,869	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
259,1	108,7	L1	L2	t	t3	t4
		259,095	61,808	0,239	0,119	0,092
Distribuição teórica ajustada		Localção	Escala	Forma		
Gama (η, θ)		247,080	60,38	-0,119001		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,068681	0,1727	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,376	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		8,278697	4	9,4877	Aceitar H0	

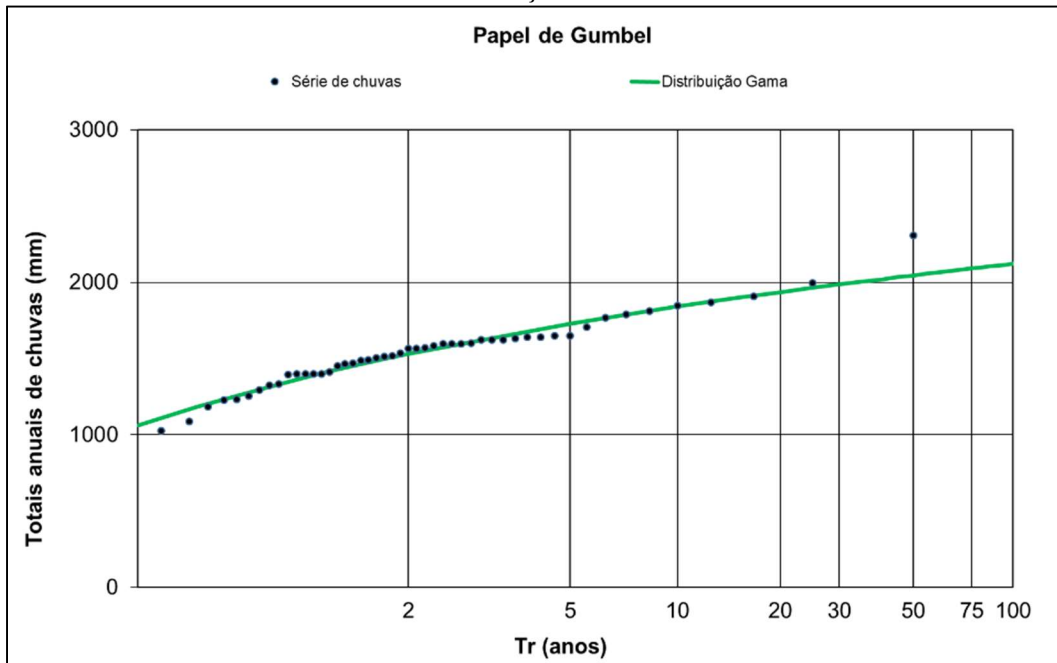
Fonte: a autora

Figura 22 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Aragoiânia à distribuição Gama



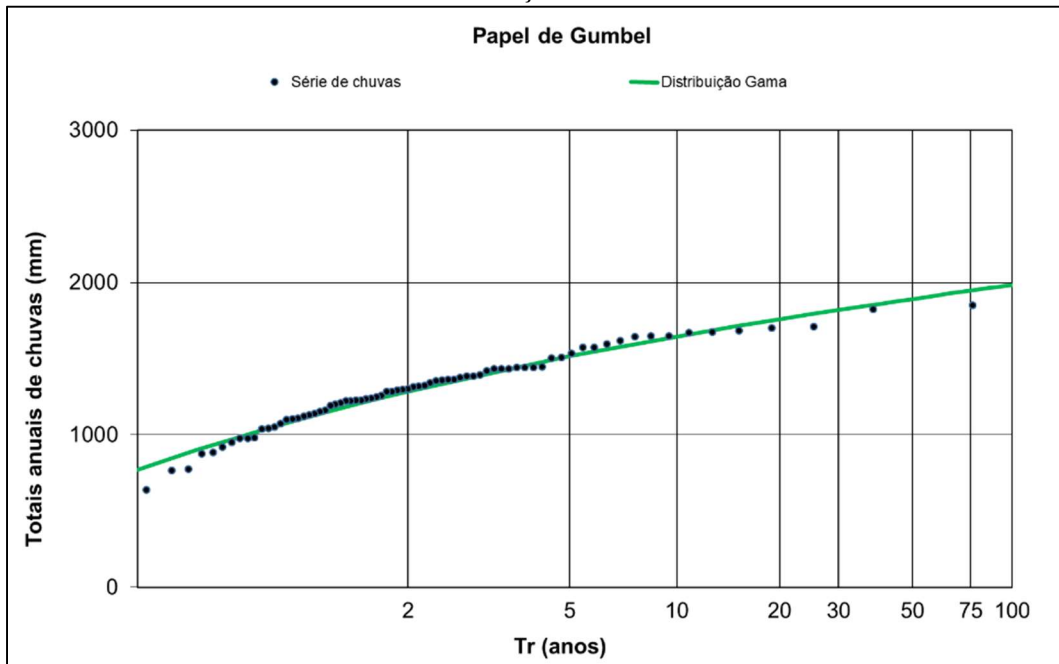
Fonte: a autora

Figura 23 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Goianópolis à distribuição Gama



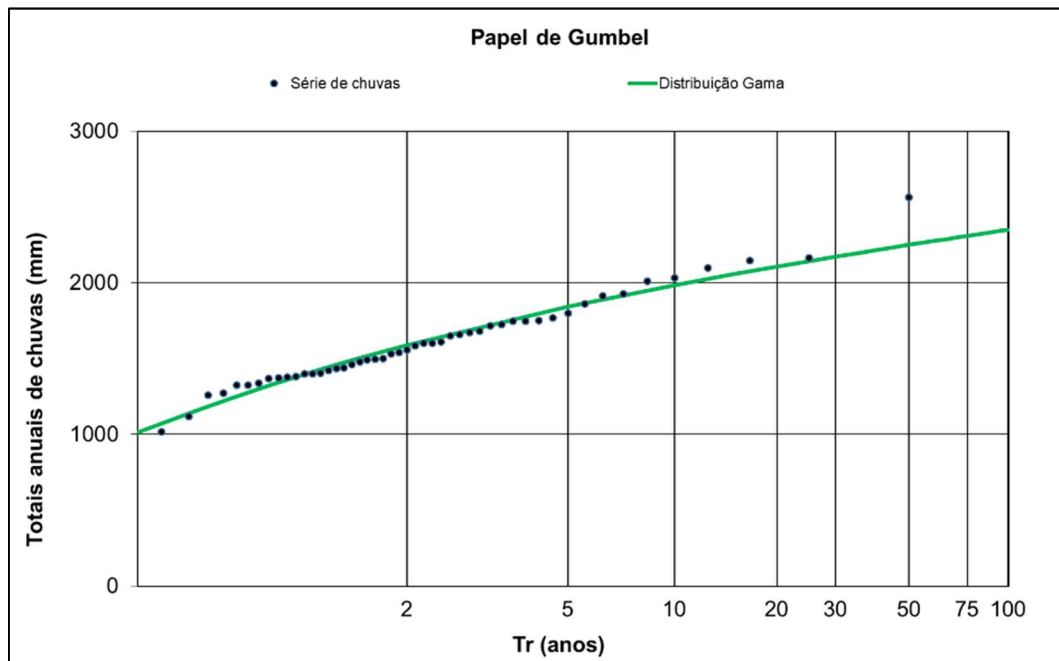
Fonte: a autora

Figura 24 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Inhumas à distribuição Gama.



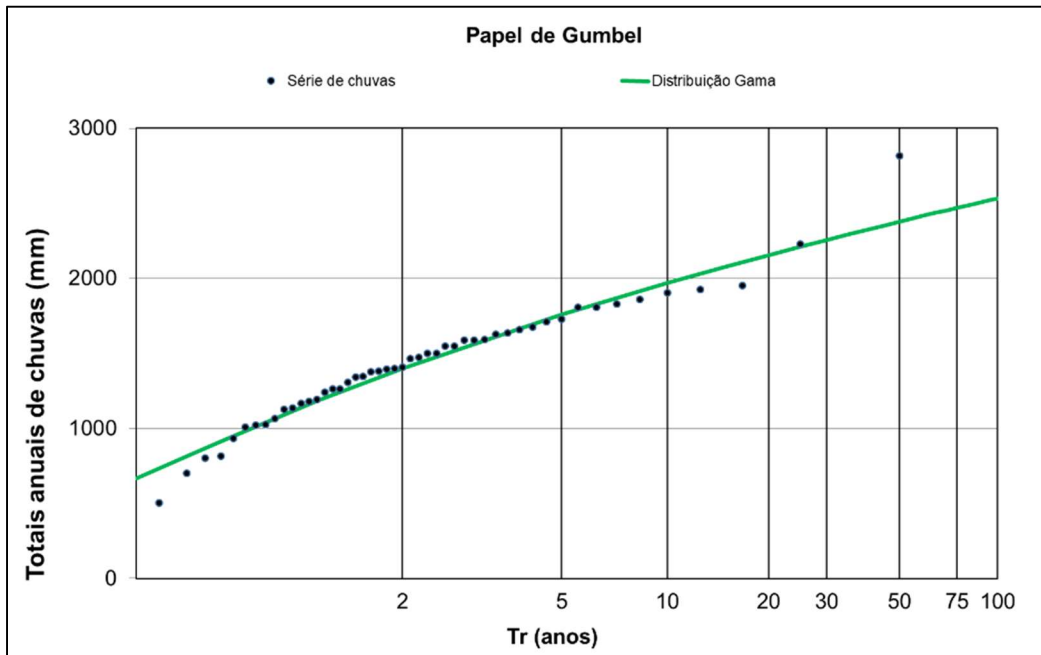
Fonte: a autora.

Figura 25 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Ouro Verde à distribuição Gama



Fonte: a autora.

Figura 26 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Trindade à distribuição Gama



Fonte: a autora.

Figura 27 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Joviânia à distribuição Gama

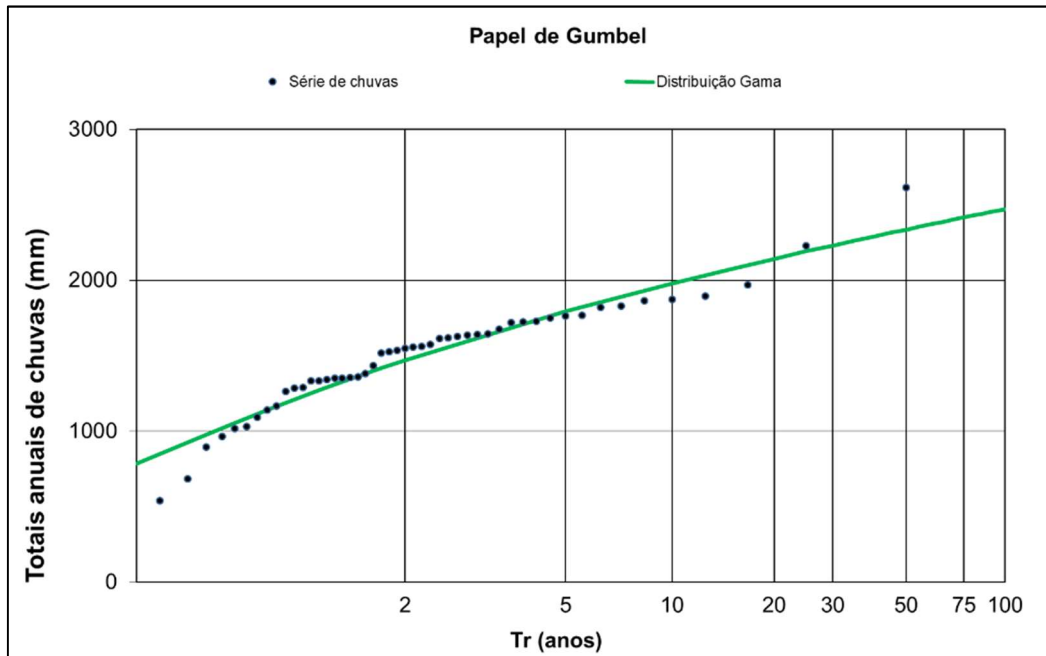
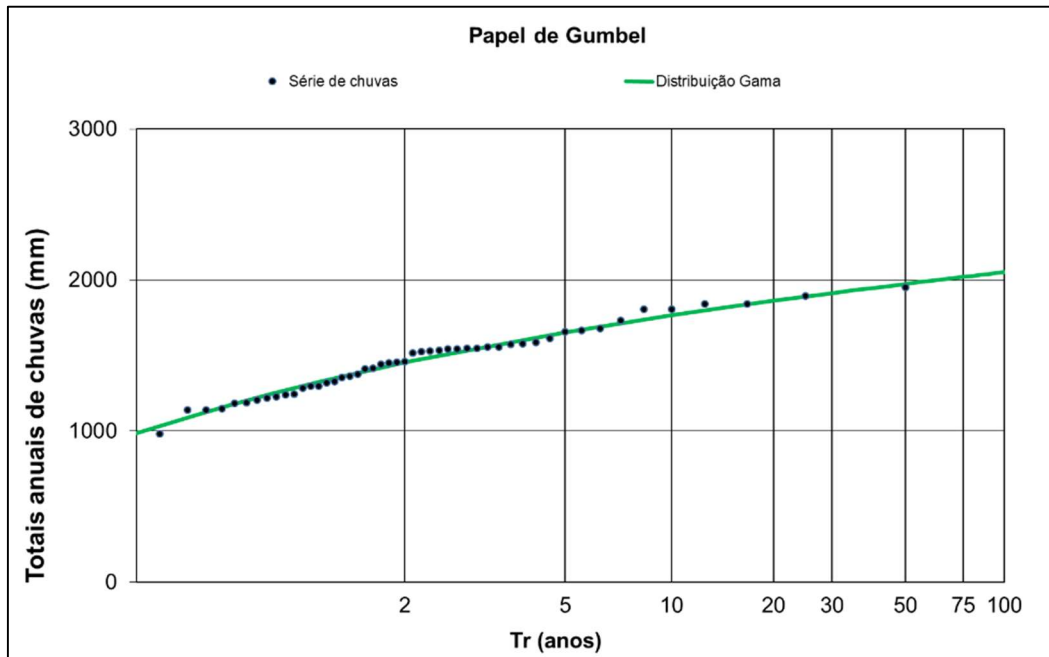


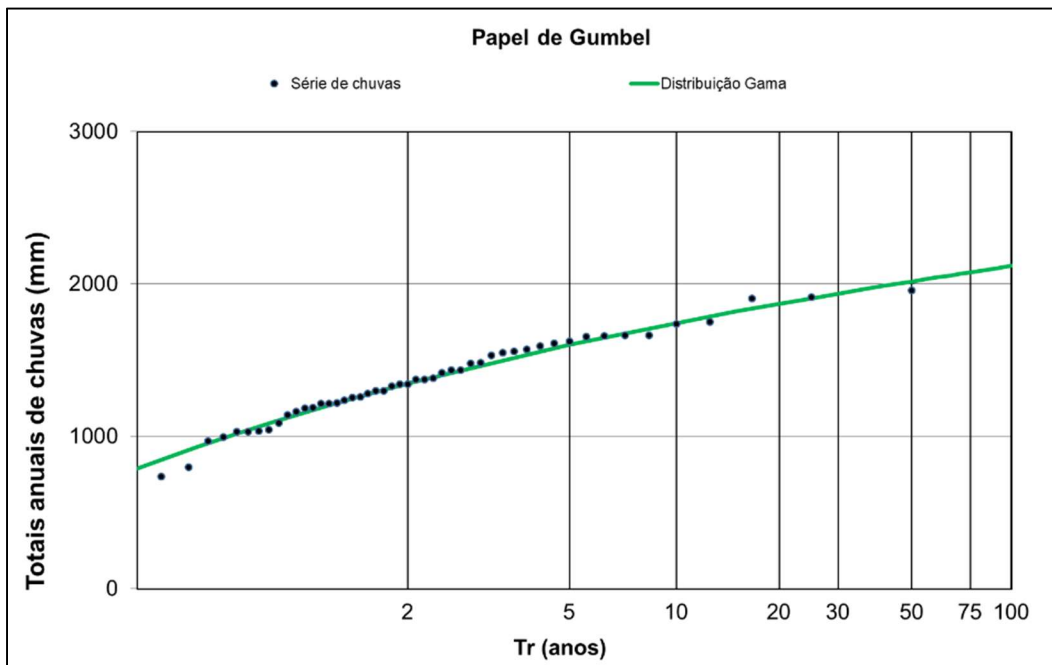
Figura 27. Fonte: a autora.

Figura 28 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Morrinhos à distribuição Gama.



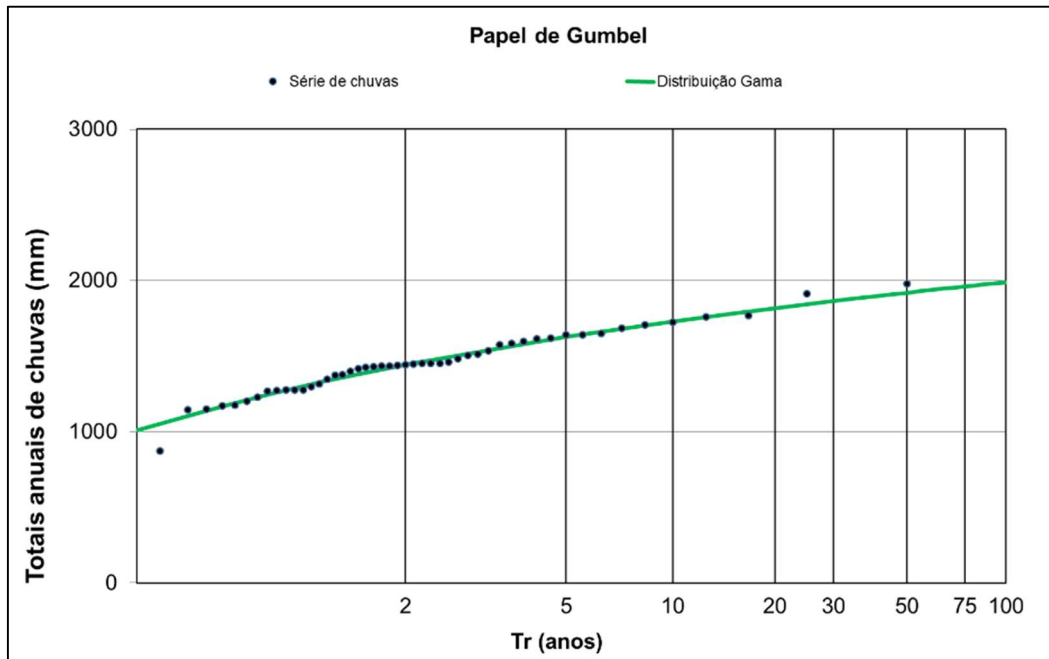
Fonte: a autora.

Figura 29 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Pontalina à distribuição Gama.



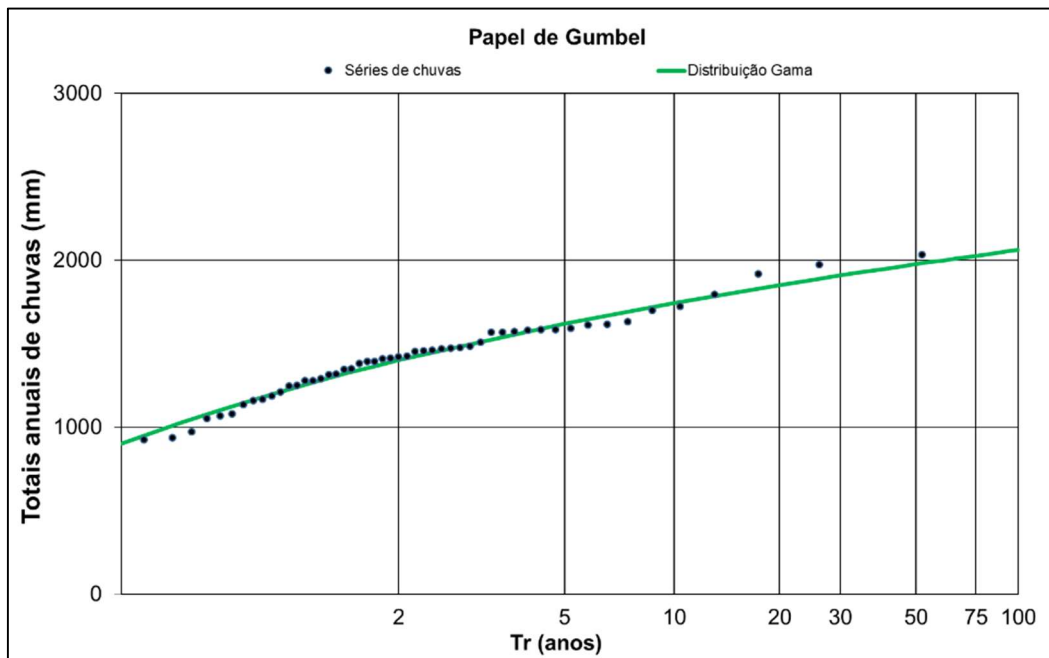
Fonte: a autora.

Figura 30 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Cromínia à distribuição Gama



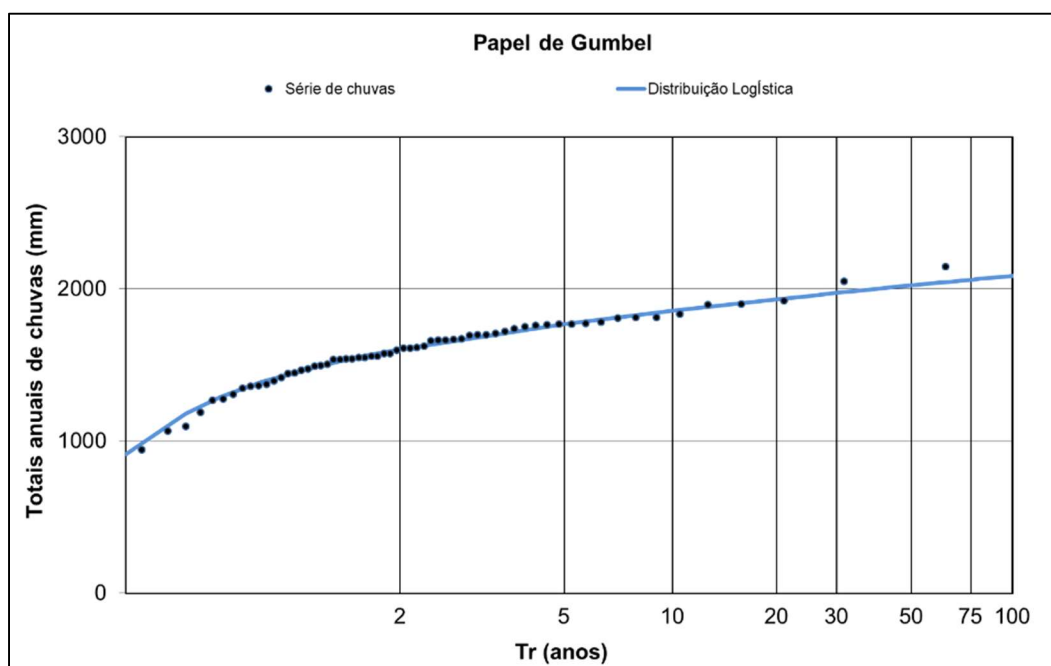
Fonte: a autora.

Figura 31 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Gama



Fonte: a autora.

Figura 32 - Ajuste das séries de totais anuais de chuvas da estação Goiânia à distribuição Logística



Fonte: a autora

Quadro 19 - Valores dos quantis associados aos Tempos de retorno (T) para Precipitação total anual das estações em estudo na Bacia do Rio Meia Ponte

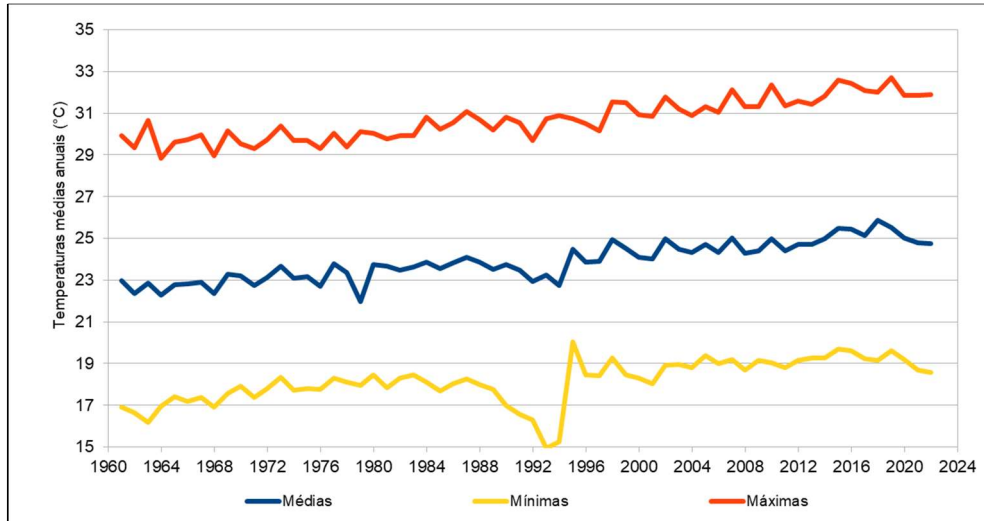
T (anos)	Distribuição Gama (h, q)										Distribuição Logística
	Aragoiânia	Goianópolis	Inhumas	Ouro Verde	Trindade	Joviânia	Morrinhos	Joviânia	Cromínia	Ponte Meia Ponte	Goiânia
1,01	1063	1061	774	1014	667	783	985	791	1007	900	912
1,05	1180	1182	901	1160	838	948	1106	929	1120	1027	1182
1,1	1243	1247	971	1238	934	1040	1170	1004	1180	1096	1288
1,2	1314	1321	1052	1329	1050	1148	1244	1092	1249	1175	1389
1,4	1395	1406	1145	1434	1186	1275	1329	1194	1327	1266	1485
1,6	1447	1459	1205	1501	1276	1357	1382	1259	1377	1325	1538
1,8	1485	1499	1250	1550	1344	1419	1422	1309	1414	1368	1575
2	1515	1531	1286	1590	1399	1469	1454	1348	1443	1402	1603
5	1706	1730	1516	1843	1759	1793	1655	1601	1627	1622	1768
10	1812	1840	1646	1985	1970	1979	1767	1744	1729	1745	1856
15	1866	1897	1714	2058	2080	2076	1824	1819	1782	1809	1901
20	1902	1935	1759	2107	2155	2142	1863	1869	1817	1852	1932
25	1929	1963	1793	2144	2211	2191	1891	1907	1843	1883	1955
30	1950	1986	1820	2173	2256	2230	1914	1937	1863	1909	1973
35	1968	2004	1842	2197	2293	2263	1933	1961	1880	1929	1989
40	1983	2020	1861	2217	2325	2290	1949	1982	1895	1947	2002
45	1996	2033	1878	2235	2353	2314	1962	2001	1907	1963	2013
50	2007	2045	1892	2251	2377	2336	1975	2017	1918	1976	2023
55	2018	2056	1905	2265	2399	2355	1986	2031	1928	1989	2032
60	2027	2066	1917	2278	2419	2372	1995	2044	1937	2000	2040
65	2035	2075	1928	2289	2437	2388	2004	2056	1946	2010	2047
70	2043	2083	1938	2300	2454	2402	2013	2067	1953	2019	2054
75	2050	2090	1947	2310	2469	2416	2020	2077	1960	2027	2060
80	2057	2097	1955	2319	2484	2428	2027	2087	1966	2035	2066
85	2063	2104	1963	2327	2497	2440	2034	2096	1972	2043	2071
90	2069	2110	1971	2335	2510	2451	2040	2104	1978	2050	2077
95	2074	2116	1978	2343	2522	2461	2046	2112	1983	2056	2081
100	2080	2121	1985	2350	2533	2471	2052	2119	1988	2062	2086
250	2168	2214	2099	2472	2728	2639	2146	2246	2074	2168	2164
500	2231	2280	2180	2559	2868	2759	2214	2336	2135	2244	2219
750	2266	2318	2226	2609	2948	2828	2252	2388	2169	2287	2249
1000	2291	2343	2258	2643	3004	2876	2278	2423	2193	2316	2271

Fonte: a autora

4.2.2 Análise dos dados climatológicos

Sobre os dados climatológicos, os valores das temperaturas aumentaram ao longo dos anos, como mostra a Figura 33, com as temperaturas médias históricas nos anos de 1961 a 2023 da estação Goiânia (INMET).

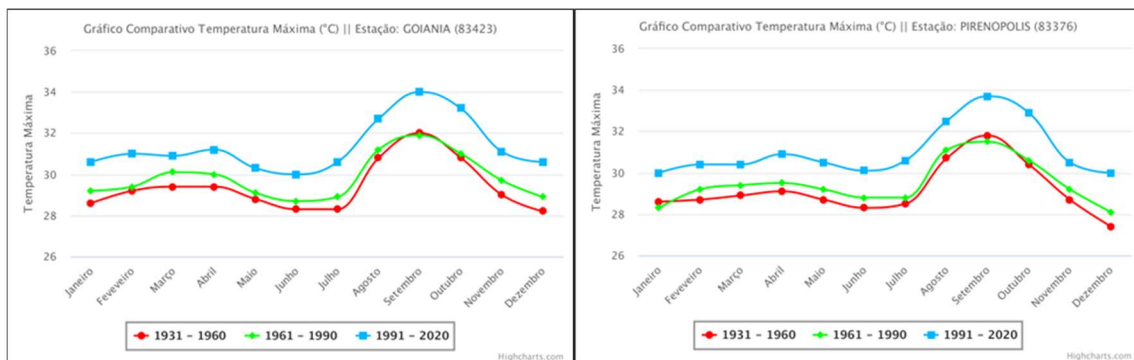
Figura 33 - Temperaturas médias da Estação Goiânia (1961 – 2023)



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024)

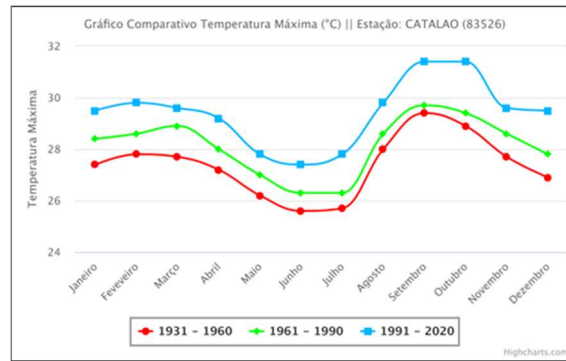
Tais aumentos foram observados também nos gráficos comparativos das temperaturas máximas e mínimas médias mensais, mostrados respectivamente nas Figuras 34 e 35, com os dados da estação Goiânia e de outras estações no estado de Goiás.

Figura 34 - Variação das temperaturas máximas em estações no estado de Goiás



(a) Estação Goiânia-GO

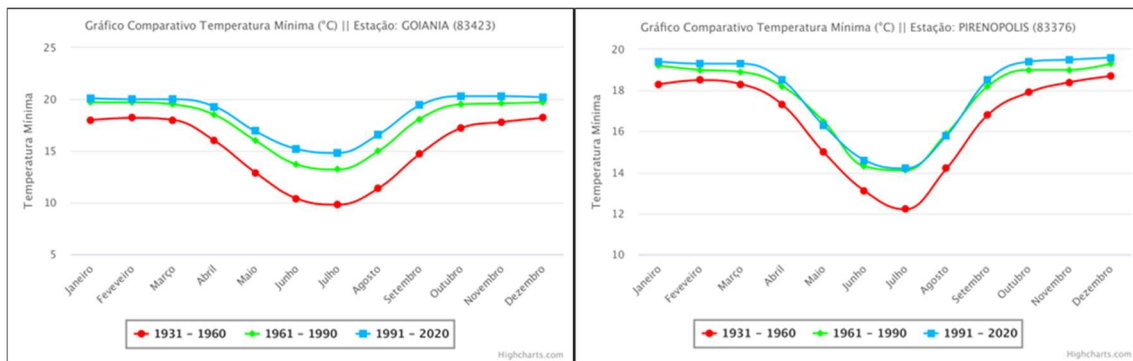
(b) Estação Pirenópolis-GO



(c) Estação Catalão-GO

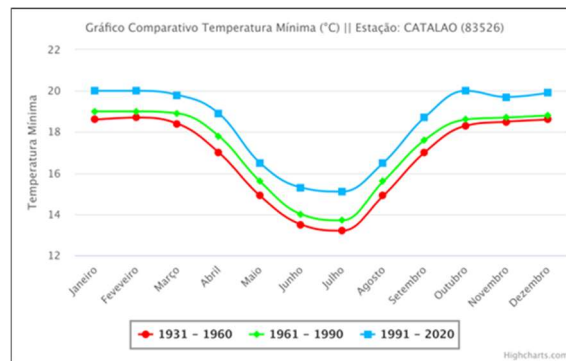
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

Figura 35 - Variação das temperaturas mínimas em estações no estado de Goiás



(a) Estação Goiânia-GO

(b) Estação Pirenópolis-GO



(c) Estação Catalão-GO

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

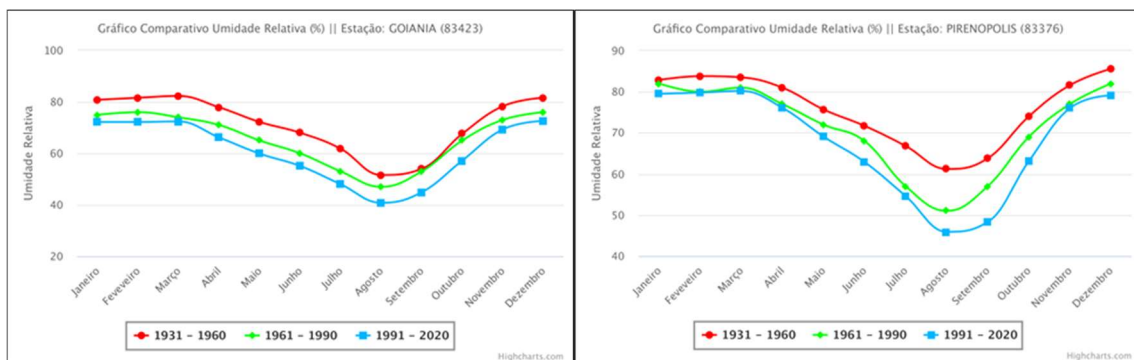
Observando os gráficos da estação Goiânia (Figura 34a), percebe-se que as temperaturas máximas aumentaram ao longo dos anos, sendo todos os valores do período 1991-2020 acima dos 30°. E o mês de setembro foi o mais quente em todos os períodos, também em todas as estações.

Quanto às temperaturas mínimas, observa-se nos gráficos da estação Goiânia (Figura 35a), que no período de 1931-1960 os valores eram mais baixos, chegando a uma média

mensal de 10°C para o mês de julho, enquanto que no período de 1991-2020 ficaram em torno de 15°C, ou seja, um aumento de cinco graus.

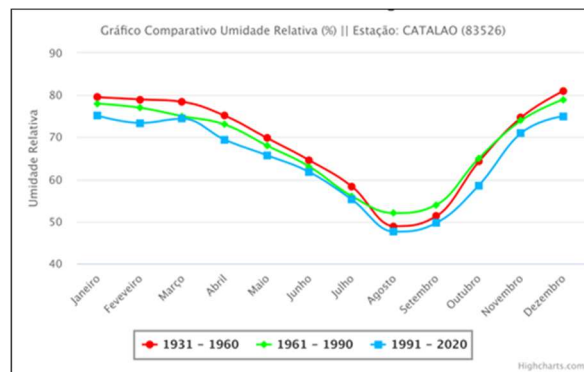
Os dados do INMET também mostram que houve alterações nos valores da umidade relativa e da evaporação, podendo-se perceber nas Figuras 36 e 37, respectivamente, que os valores da umidade relativa reduziram e da evaporação aumentaram ao longo dos anos, na estação Goiânia e em outras estações no estado de Goiás. Comparando os valores de 1931-1960 e 1961-1990 com os valores de 1991-2020.

Figura 36 - Variação da umidade relativa em estações no estado de Goiás



(a) Estação Goiânia-GO

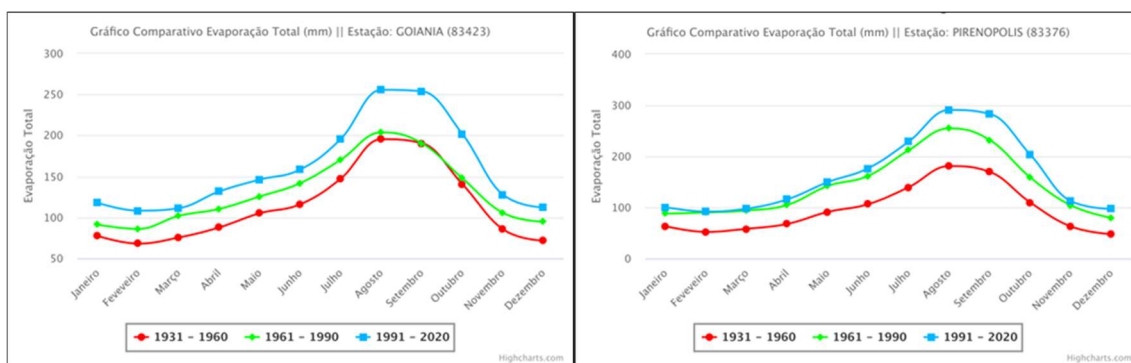
(b) Estação Pirenópolis-GO



(c) Estação Catalão-GO

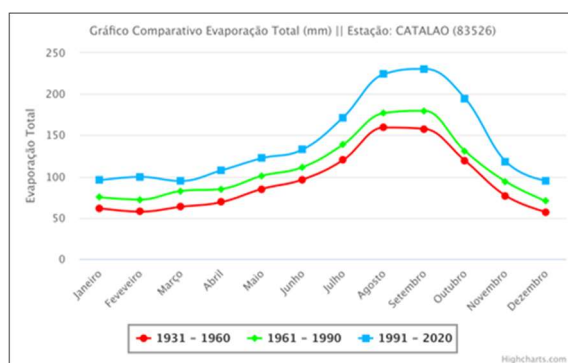
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024)

Figura 37 - Variação da evaporação em estações no estado de Goiás



(a) Estação Goiânia-GO

(b) Estação Pirenópolis-GO



(c) Estação Catalão-GO

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2024).

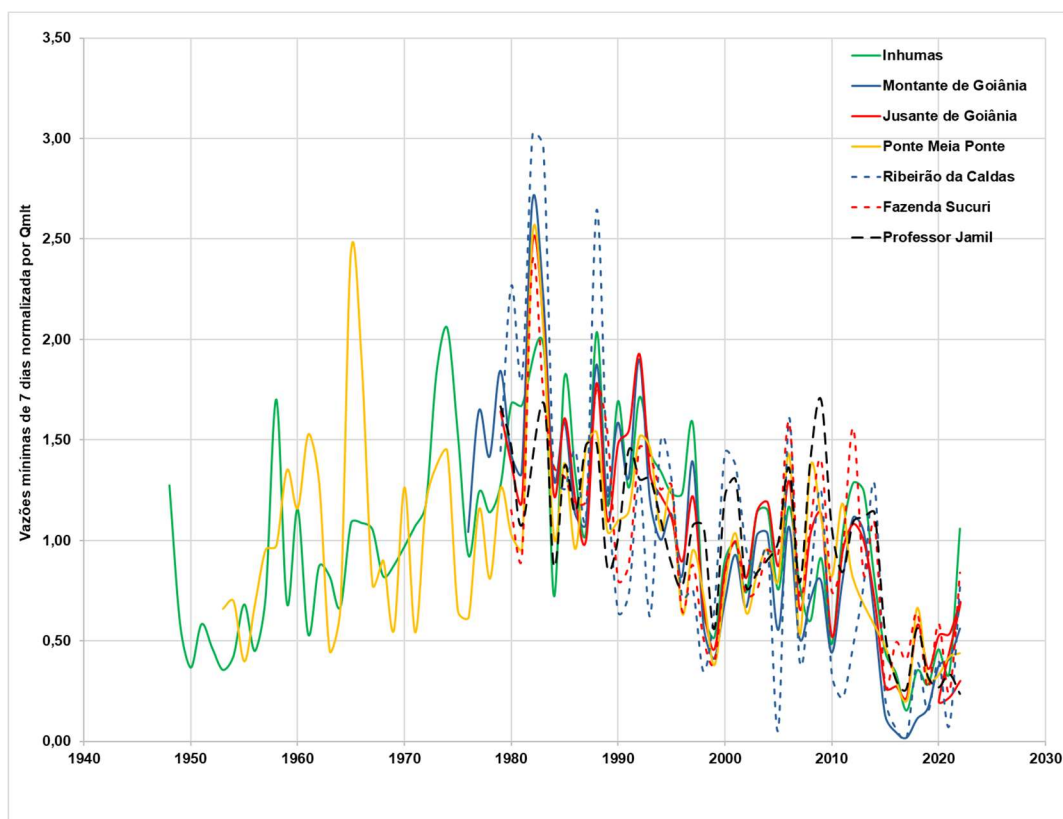
Os aumentos nas temperaturas podem ter causado esses aumentos nas taxas de evaporação e redução da umidade relativa ao longo dos anos na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, podendo ser explicados como impactos das mudanças climáticas, que ocorrem em todo o mundo.

Considerando que na região Centro-oeste ocorre um grande período de estiagem, praticamente sem chuvas nos meses de junho a agosto, tais alterações são agravadas nesses períodos do ano. Essas anomalias na temperatura também podem desencadear eventos de seca, pois a temperatura é um dos fatores atmosféricos responsáveis pelo balanço hídrico (Bevacqua, 2021).

4.3 ANÁLISE DAS VAZÕES MÍNIMAS

Para verificar o comportamento das vazões mínimas ao longo do tempo na bacia, a Figura 38 mostra as séries de vazões mínimas médias de 7 dias normalizadas pela média de longo termo (Q_{mit}), para as quatro estações localizadas no Rio Meia Ponte e as três estações em afluentes, onde pode-se perceber a variação das vazões ao longo dos anos em cada estação. E nota-se uma forte queda nos valores das vazões entre os anos de 2015 e 2021.

Figura 38 - Vazões mínimas médias de 7 dias na Bacia do Rio Meia Ponte



Fonte: a autora.

De acordo com a Figura 38, considerando um valor médio de 1,5 para as vazões mínimas normalizadas na bacia, e observando os valores da estação Inhumas, com série mais antiga, de 1948 a 2022, percebe-se que a maioria das vazões mínimas ficou abaixo da média nos períodos de 1948 a 1964 e de 1998 a 2021. Observa-se que ocorreram valores abaixo da média em anos mais antigos. Porém, as vazões do período 2015-2021 continuam a ser os mais baixos das séries dessas estações.

Para saber o quanto as precipitações influenciam as vazões, pode-se considerar o conceito de elasticidade da precipitação na vazão, definida por Chiew (2006), como a mudança proporcional na vazão média anual dividida pela mudança proporcional na precipitação média anual. A elasticidade é uma estimativa simples da sensibilidade da vazão de longo prazo às mudanças na precipitação de longo prazo e é particularmente útil como uma estimativa inicial do impacto das mudanças climáticas em projetos de recursos hídricos e terrestres.

Esse valor da elasticidade foi calculado para a Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, utilizando os dados das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte, que possuem séries de precipitação e vazão, representando respectivamente as áreas de drenagem no início da

bacia e no final da bacia. E utilizando o estimador não paramétrico Σ_p proposto por Sankarasubramaniam *et al.* (2001), expresso pela equação:

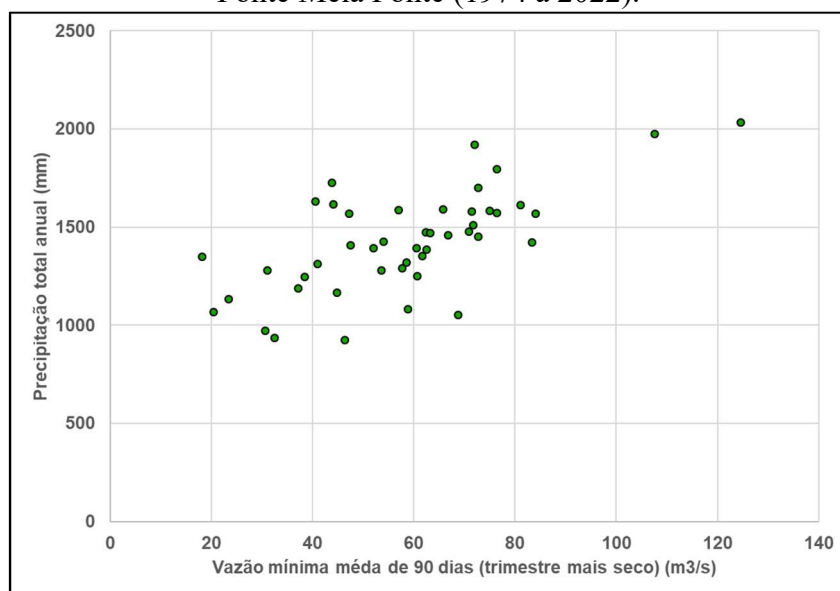
$$\Sigma_p = \text{média} \left(\frac{Q_1 - Q_{\text{med}}}{P_1 - P_{\text{med}}} \frac{P_{\text{med}}}{Q_{\text{med}}} \right) \quad (61)$$

Onde: P_{med} e Q_{med} são as médias anuais de chuva e vazão, respectivamente. E para obter o valor da elasticidade Σ_p são calculados os pares P_1 e Q_1 das séries anuais e a média desses valores é estimada.

Um valor da elasticidade da precipitação na vazão em torno de 1,5 foi obtido, ou seja, uma mudança de 1% na precipitação média anual resulta em uma mudança de 1,5% na vazão média anual. Podendo-se considerar que as precipitações influenciam significativamente as vazões nessa bacia, pois se a precipitação diminuir 10% a vazão diminuirá 15%.

E a Figura 39 mostra uma correlação entre as precipitações e as vazões, utilizando as precipitações totais anuais e as vazões mínimas médias de 90 dias da estação Ponte Meia Ponte, representando toda a Bacia do Rio Meia Ponte.

Figura 39 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias de 90 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1974 a 2022).



Fonte: a autora.

Na correlação apresentada na Figura 39, traçando-se uma linha de tendência linear, encontra-se um coeficiente de determinação igual a $R^2 = 0,454$. Ou seja, 45% na relação entre essas variáveis, podendo-se verificar o quanto a precipitação influencia a vazão nessa bacia.

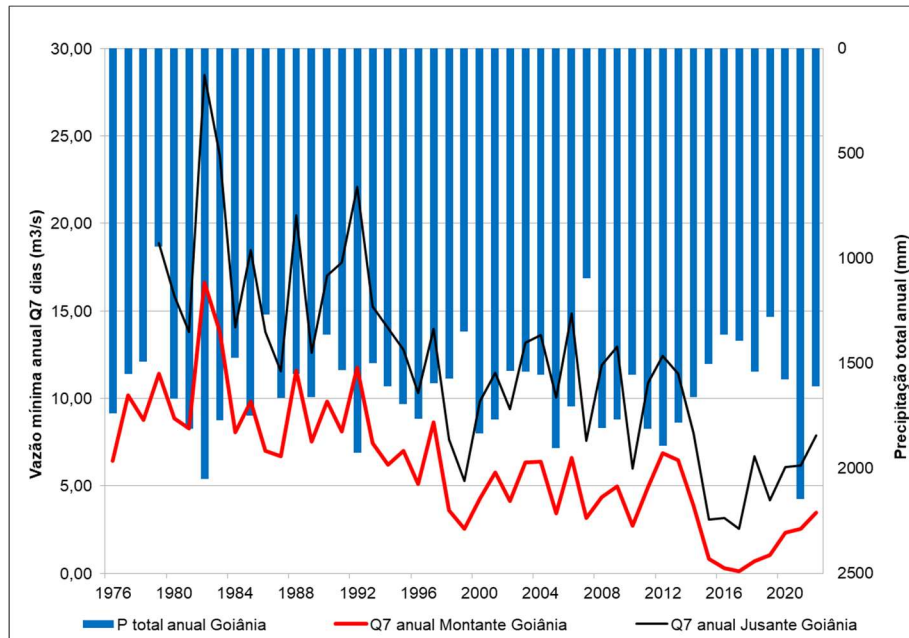
Para comparação entre as tendências das séries de precipitações e vazões, são mostrados nas Figuras 40 a 48, os dados de precipitação das estações Goiânia, Inhumas e Ponte Meia Ponte, e os dados de vazão das estações Montante de Goiânia, Jusante de Goiânia, Inhumas e Ponte Meia Ponte.

Sendo na Figura 40 mostradas as precipitações totais anuais da estação Goiânia com as vazões mínimas médias anuais de 7 dias das estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia, referentes ao período de 1976 a 2022.

Na Figura 41 são mostradas as precipitações totais de 90 dias (trimestre mais seco) da estação Goiânia com as vazões médias de 90 dias (trimestre mais seco), das estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia, referentes ao período de 1976 a 2022.

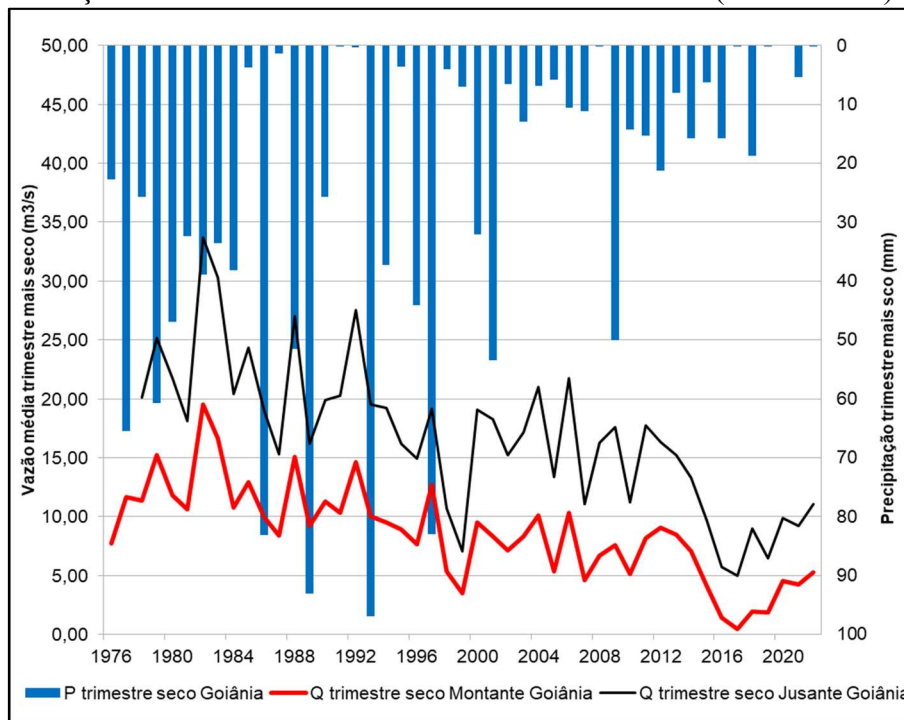
E na Figura 42 são mostradas as precipitações totais de 180 dias (semestre mais seco) da estação Goiânia com as vazões médias de 180 dias (semestre mais seco), das estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia, referentes ao período de 1976 a 2022.

Figura 40 - Precipitações totais anuais da estação Goiânia e vazões mínimas médias anuais de 7 dias das estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia (1976 a 2022).



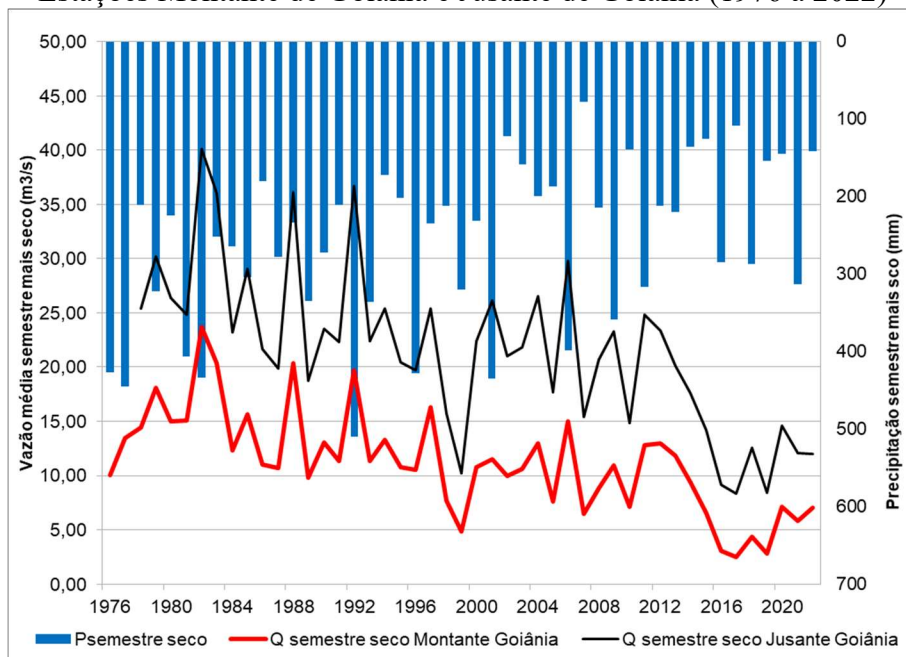
Fonte: a autora.

Figura 41 - Precipitações totais da estação Goiânia e vazões médias de 90 dias das Estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia - (1976 a 2022)



Fonte: a autora.

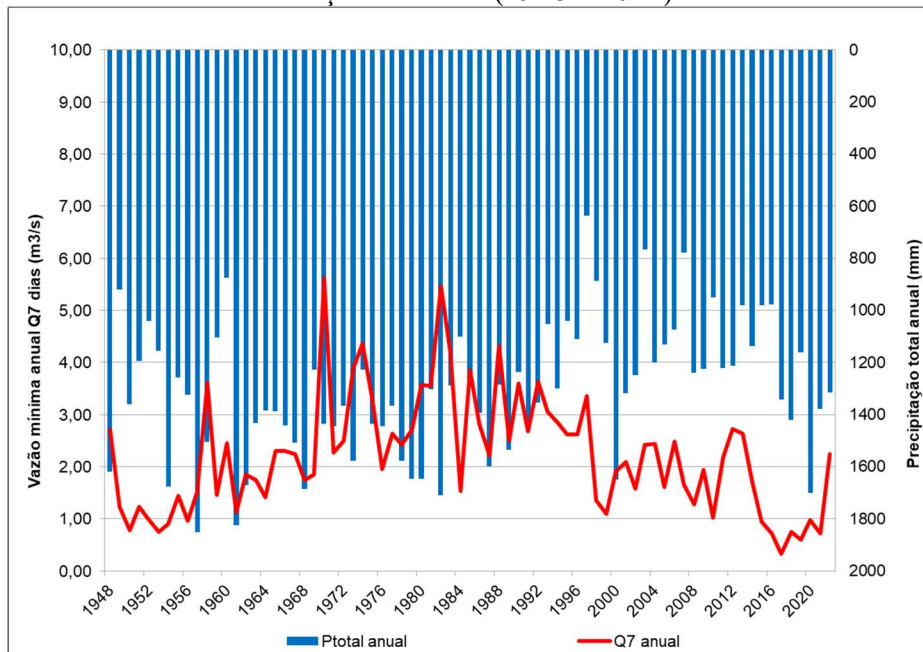
Figura 42 - Precipitações totais da estação Goiânia e vazões médias de 180 dias das Estações Montante de Goiânia e Jusante de Goiânia (1976 a 2022)



Fonte: a autora.

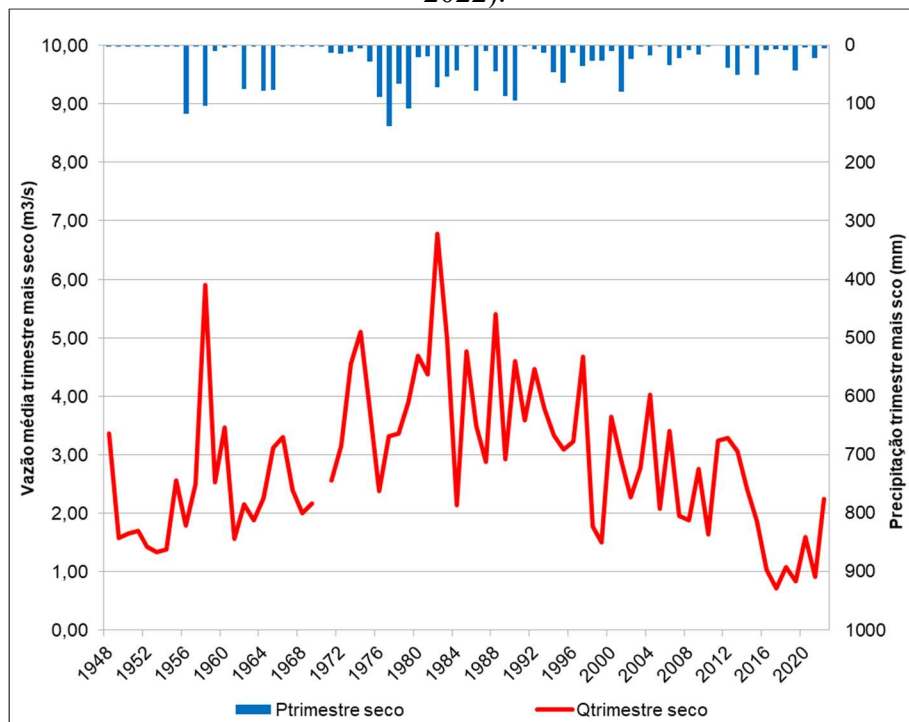
Nas Figuras 43 a 45 são mostrados os dados da estação Inhumas, referentes ao período de 1948 a 2022, respectivamente, das precipitações totais anuais e vazões mínimas médias anuais de 7 dias, das precipitações totais e vazões médias de 90 dias (trimestre mais seco) e das precipitações totais e vazões médias de 180 dias (semestre mais seco).

Figura 43 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias anuais de 7 dias da Estação Inhumas (1948 a 2022)



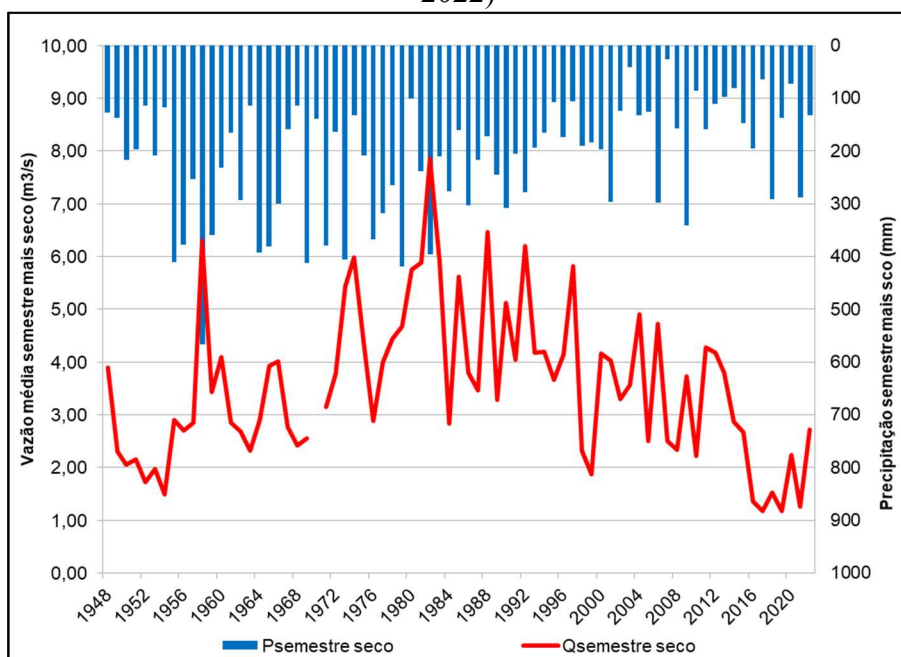
Fonte: a autora.

Figura 44 - Precipitações totais e vazões médias de 90 dias da Estação Inhumas (1948 a 2022).



Fonte: a autora.

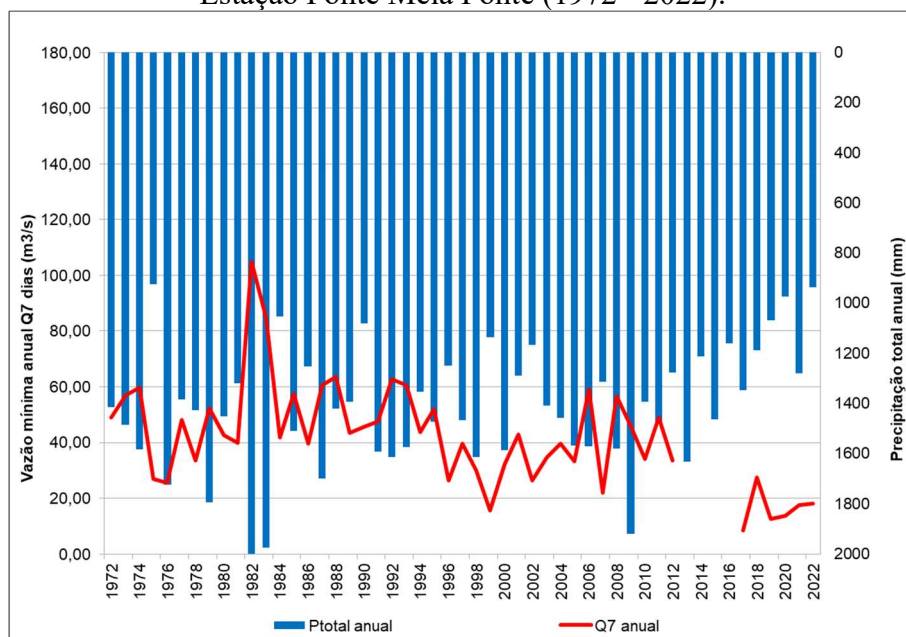
Figura 45 - Precipitações totais e vazões médias de 180 dias da Estação Inhumas (1948 - 2022)



Fonte: a autora.

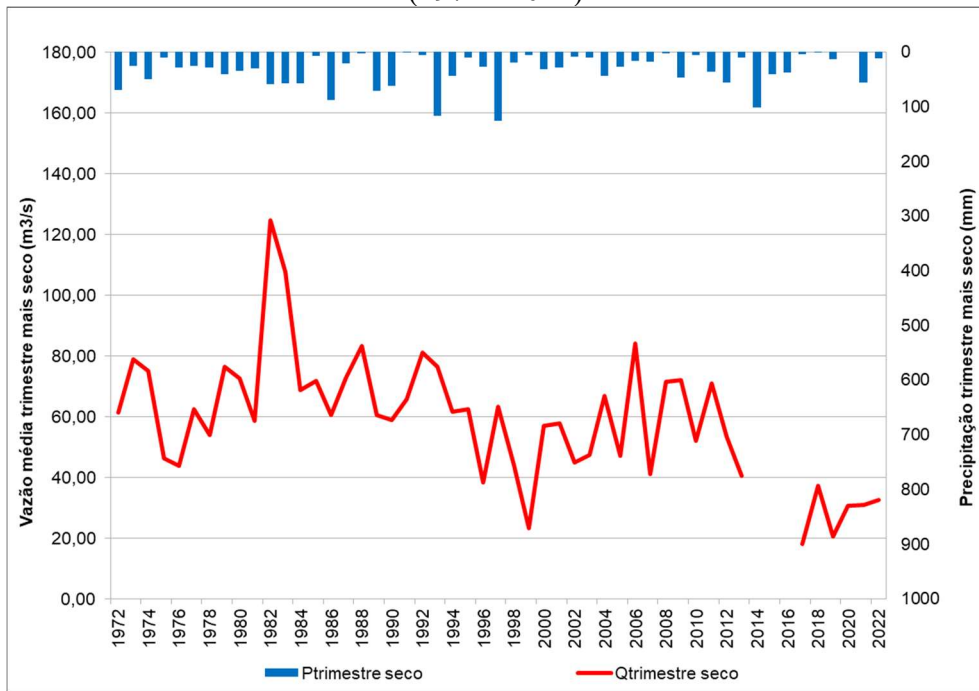
Nas Figuras 46 a 48 são mostrados os dados da estação Ponte Meia Ponte, referentes ao período de 1972 a 2022, respectivamente, das precipitações totais anuais com as vazões mínimas médias anuais de 7 dias, das precipitações totais e vazões médias de 90 dias (trimestre mais seco) e das precipitações totais e vazões médias de 180 dias (semestre mais seco).

Figura 46 - Precipitações totais anuais e vazões mínimas médias anuais de 7 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).



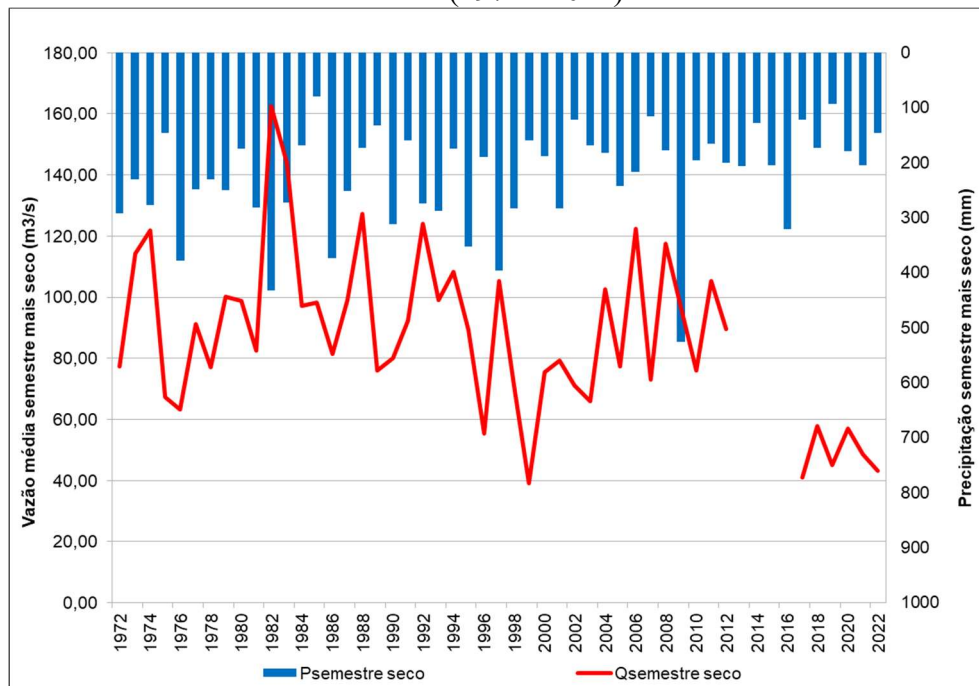
Fonte: a autora.

Figura 47 - Precipitações totais e vazões médias de 90 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).



Fonte: a autora.

Figura 48 - Precipitações totais e vazões médias de 180 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972 - 2022).



Fonte: a autora.

Observando os gráficos das Figuras 40 a 48, pode-se perceber a mesma tendência, em que as precipitações e vazões sofrem queda nos últimos anos, tanto nos dados anuais, quanto do trimestre mais seco (de 90 dias) e semestre mais seco (de 180 dias).

4.3.1 Análises estatísticas das vazões

Foram realizadas análises estatísticas para as séries de vazões mínimas médias de 7 dias, séries de vazões mínimas médias com durações de 90 dias (trimestre mais seco) e séries de vazões mínimas médias de 180 dias (semestre mais seco), das séries de vazões das sete estações localizadas na bacia em estudo, montadas por ano hidrológico. Sendo feitos os testes estatísticos: de independência (Wald; Wolfowitz, 1943), de homogeneidade (Mann; Whitney, 1947) e de estacionariedade de Spearman, com nível de significância de 0,05.

Os resultados do teste de independência foram “rejeitadas” para todas as séries. E para os testes de estacionariedade e homogeneidade, as estações Inhumas e Ponte foram “não rejeitadas” e as demais estações foram “rejeitadas”.

Da mesma forma que para as chuvas, os resultados mostrando a não estacionariedade das séries de vazões eram esperados nessa bacia com alterações antrópicas, pois nas séries não estacionárias incluem tendências de saltos, relacionadas a alterações bruscas em uma bacia hidrográfica ou trecho fluvial, relacionados a flutuações climáticas de longo período (Naghetini; Pinto, 2007).

Como alternativa, foram montadas séries de vazões por ano civil, para as sete estações, visto que o período seco na região, com vazões mínimas, ocorre entre os meses de maio e outubro, não causando interferências nos valores mínimos anuais. Sendo aplicados novamente os testes de estacionariedade, homogeneidade e independência, também para as séries mínimas médias de 90 dias e as séries mínimas médias de 180 dias. Porém, apenas as séries das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte foram “não rejeitadas” nos três testes e as séries das demais estações continuaram “rejeitadas” nos três testes, inviabilizando um estudo de análise de frequência regional de vazões na bacia. Os resultados são mostrados nos Quadros 20 a 26.

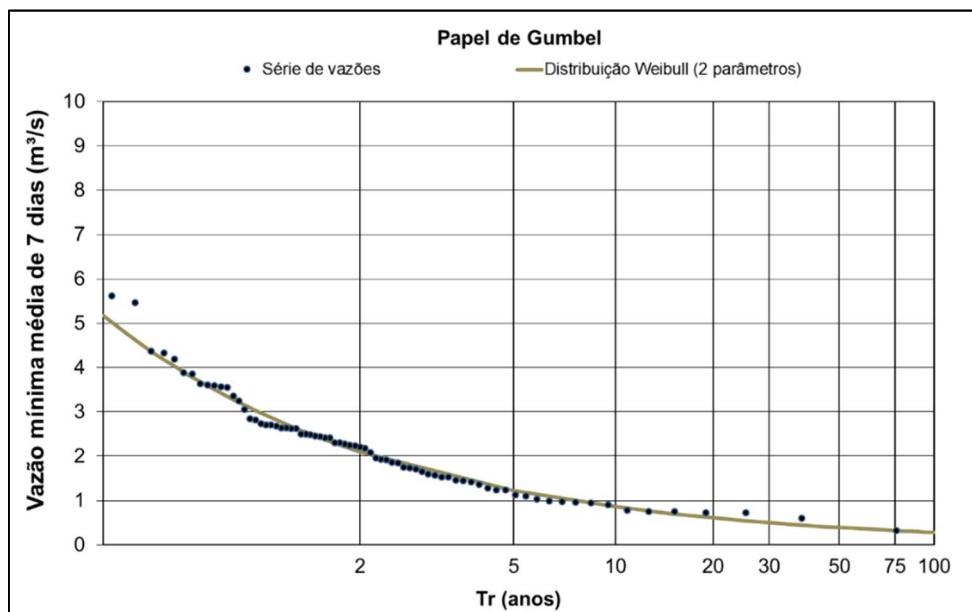
Na definição da distribuição teórica de probabilidade as candidatas foram Gumbel e Weibull (2 e 3 parâmetros), sendo calculados os respectivos parâmetros pelo método dos momentos-L (Hosking e Wallis, 1997). E para verificação da aderência à distribuição empírica, foram realizados os testes: Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling e Qui². As séries vazões das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte também foram “aceitas” nos testes de aderência. Sendo apresentados os resultados nos Quadros 20 a 26.

Verificando o ajuste visual da distribuição empírica de cada estação (série de vazões ordenada), nos gráficos das distribuições teóricas candidatas plotadas em um papel de

probabilidades, foram retiradas vazões superiores, visualmente fora da tendência (“outliers” superiores). Sendo as séries de vazões mínimas médias de 7 dias e as séries de vazões mínimas médias de 90 dias das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte melhor ajustadas à distribuição Weibull, com 2 parâmetros, como mostram as Figuras 49 a 52, respectivamente. As séries de vazões médias de 180 dias das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte e as séries das demais estações não apresentaram bons ajustes em nenhuma das distribuições teóricas testadas Gumbel e Weibull (2 e 3 parâmetros).

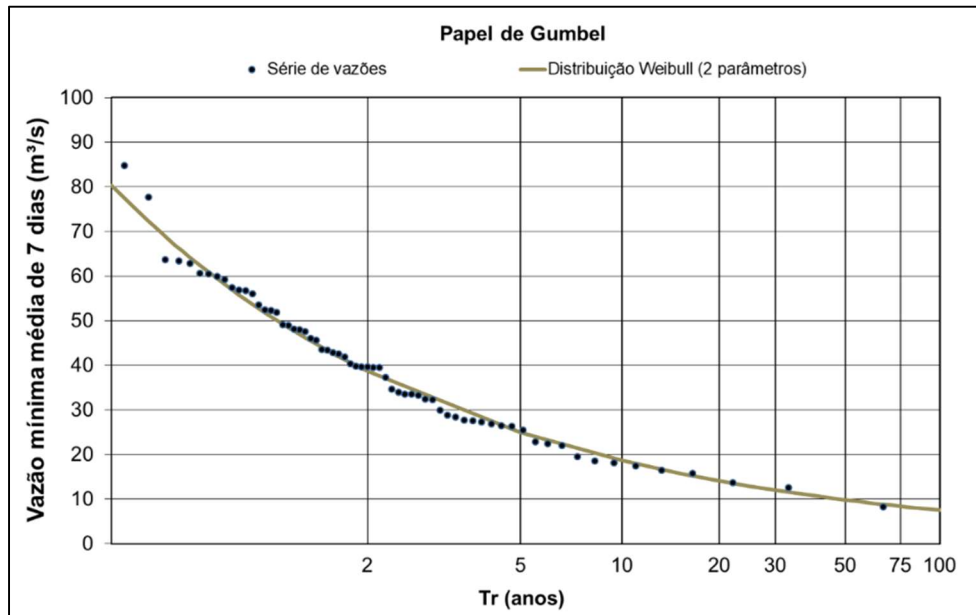
Em seguida foram estimados os quantis associados a diferentes tempos de retorno, para as estações Inhumas e Ponte Meia Ponte, ajustadas à distribuição Weibull, com 2 parâmetros, para as séries de vazões mínimas médias de 7 dias e as séries mínimas médias de 90 dias. Sendo calculadas as respectivas vazões mínimas de sete dias com período de retorno de 10 anos, ($Q_{7,10}$), as vazões de referência para outorgas em alguns estados. São mostrados os resultados dos quantis no Quadro 27.

Figura 49 - Ajuste das vazões mínimas médias de 7 dias da estação Inhumas à distribuição Weibull (2 parâmetros)



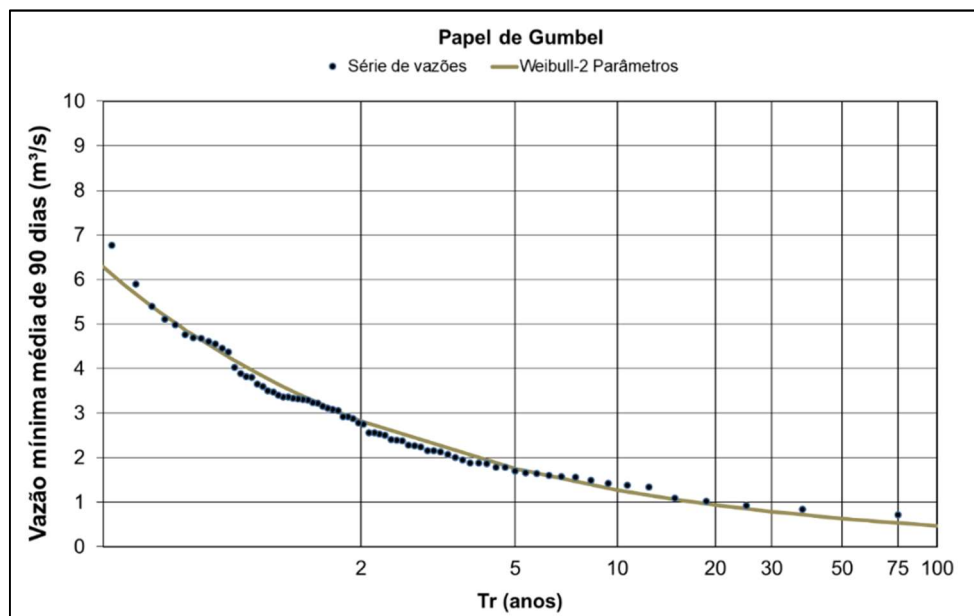
Fonte: a autora

Figura 50 - Ajuste das vazões mínimas médias de 7 dias da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Weibull (2 parâmetros)



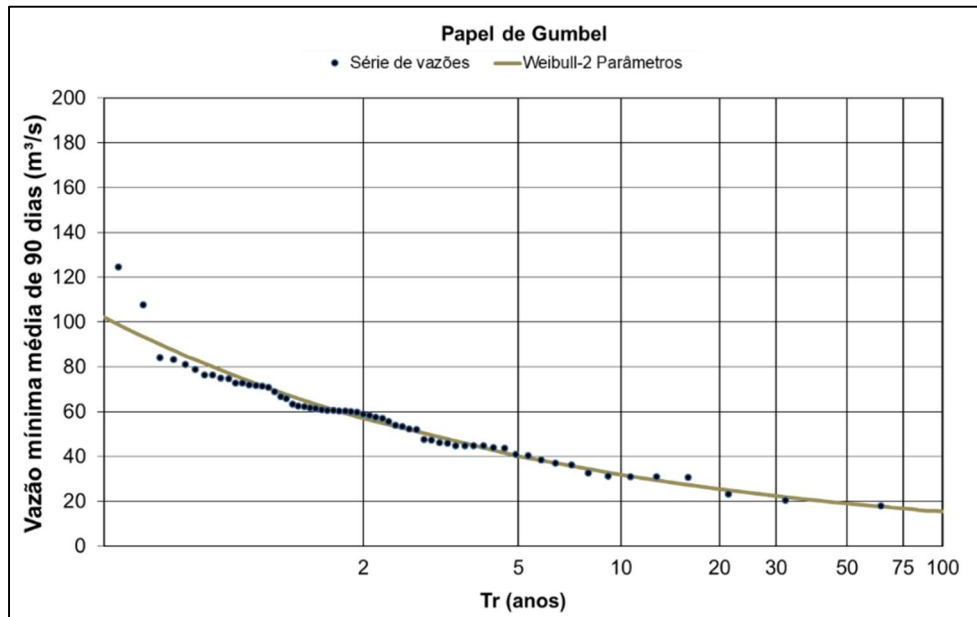
Fonte: a autora

Figura 51 - Ajuste das vazões mínimas médias de 90 dias da estação Inhumas à distribuição Weibull (2 parâmetros)



Fonte: a autora

Figura 52 - Ajuste das vazões mínimas médias de 90 dias da estação Ponte Meia Ponte à distribuição Weibull (2 parâmetros)



Fonte: a autora

Quadro 20 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Inhumas (1948-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,440	Rejeitar H ₀ , Observações dependentes				
Homogeneidade	-0,487	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-0,637	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
2,2	1,1	L1	L2	t	t3	t4
		2,213	0,626	0,283	0,135	0,123
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		2,500		2,100		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,074	0,157	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,294	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,953	6	12,592	Aceitar H ₀	
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,254	Rejeitar H ₀ , Observações dependentes				
Homogeneidade	-0,719	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-0,711	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
2,9	1,3	L1	L2	t	t3	t4
		2,869	0,714	0,249	0,124	0,110
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		3,300		2,373		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,074678	0,1581	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,399	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		4,308678	6	12,5916	Aceitar H ₀	
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,302	Rejeitar H ₀ , Observações dependentes				
Homogeneidade	-0,546	Não Rejeitar H ₀ , Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-0,420	Não Rejeitar H ₀ , Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
3,5	1,4	L1	L2	t	t3	t4
		3,548	0,814	0,229	0,117	0,111
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		3,900		2,695		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,081987	0,1581	Aceitar H ₀		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,544763	0,752	Aceitar H ₀		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		9,235	6	12,592	Aceitar H ₀	

Fonte: a autora

Quadro 21 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Montante de Goiânia (1974-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,805	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-4,866	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-5,521	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
6,00	3,30	L1	L2	t	t3	t4
		5,959	1,884	0,316	0,028	0,106
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		6,800		1,890		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,090	0,2005	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,681	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estadística	GL	Qui ²	Teste	
		4,874	4	9,488	Aceitar H0	
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,496	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-4,949	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-5,319	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
8,60	4,00	L1	L2	t	t3	t4
		8,631	2,267	0,263	0,020	0,170
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		9,700		2,278		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,081296	0,1963	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,515	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estadística	GL	Qui ²	Teste	
		1,885551	4	9,4877	Aceitar H0	
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,670	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-4,124	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,592	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
11,2	4,7	L1	L2	t	t3	t4
		11,216	2,627	0,234	0,056	0,180
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		12,600		2,556		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,07915	0,1963	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,394167	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estadística	GL	Qui ²	Teste	
		2,930	4	9,488	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 22 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Jusante de Goiânia (1974-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	4,138	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-4,097	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-5,475	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
11,1	5,4	L1	L2	t	t3	t4
		11,104	3,102	0,279	0,026	0,100
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		12,500		2,166		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,080	0,2005		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,473	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		3,849	4	9,488	Aceitar H0	
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,917	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-3,588	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-5,016	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
16,8	6,4	L1	L2	t	t3	t4
		16,808	3,623	0,216	0,031	0,157
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		18,900		2,846		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,092565	0,2027		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,365	0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		4,4562	4	9,4877	Aceitar H0	
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,043	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,952	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,517	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
21,6	7,5	L1	L2	t	t3	t4
		21,558	4,256	0,197	0,041	0,162
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		24,100		3,157		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab		Teste	
		0,101135	0,2027		Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}		Teste	
		0,407741	0,752		Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		16,247	4	9,488	Rejeitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 23 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Ribeirão das Caldas (1974-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	2,960	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-3,509	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,291	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
0,30	0,20	L1	L2	t	t3	t4
		0,257	0,097	0,377	0,096	0,087
Distribuição teórica ajustada			Localção		Escala	
Weibull-2P (α, β)			0,300		1,530	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,087	0,2099	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			0,798	0,752	Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			11,247	3	7,815	Rejeitar H0
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,580	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-3,179	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,656	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
0,4	0,2	L1	L2	t	t3	t4
		0,428	0,138	0,322	0,158	0,104
Distribuição teórica ajustada			Localção		Escala	
Weibull-2P (α, β)			0,500		2,101	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,124563	0,2027	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			0,803	0,752		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			9,455179	4	9,4877	Aceitar H0
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estadística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,290	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,974	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,385	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
0,6	0,3	L1	L2	t	t3	t4
		0,557	0,146	0,262	0,143	0,127
Distribuição teórica ajustada			Localção		Escala	
Weibull-2P (α, β)			0,700		2,101	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,154552	0,2027	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			1,349331	0,752	Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			8,461	4	9,488	Aceitar H0

Fonte: a autora

Quadro 24 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Fazenda Sucuri (1974-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,279	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,551	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,806	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
5,7	2,6	L1	L2	t	t3	t4
		5,702	1,466	0,257	0,091	0,132
Distribuição teórica ajustada			Locação		Escala	
Weibull-2P (α, β)			6,400		2,328	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,064	0,2074	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			0,177	0,752	Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			2,683	4	9,488	Aceitar H0
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,493	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,624	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,884	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
7,7	3,1	L1	L2	t	t3	t4
		7,720	1,745	0,226	0,031	0,160
Distribuição teórica ajustada			Locação		Escala	
Weibull-2P (α, β)			8,700		2,676	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,061488	0,2074	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			0,229	0,752		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			3,362458	4	9,4877	Aceitar H0
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,318	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,235	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,452	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-LE RAZÕES-L				
10	3,4	L1	L2	t	t3	t4
		10,014	1,918	0,192	0,063	0,120
Distribuição teórica ajustada			Locação		Escala	
Weibull-2P (α, β)			11,200		3,231	
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$			Dcal	DTab	Teste	
			0,080183	0,2074	Aceitar H0	
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$			A ²	A ² _{crit,α}	Teste	
			0,242751	0,752	Aceitar H0	
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$			Estatística	GL	Qui ²	Teste
			2,417	4	9,488	Aceitar H0

Fonte: a autora

Quadro 25 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Professor Jamil (1974-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,383	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,981	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-4,203	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
4,60	2,00	L1	L2	t	t3	t4
		4,568	1,138	0,249	0,003	0,149
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		5,200		2,456		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,092	0,205	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,639	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		6,016	4	9,488	Aceitar H0	
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	3,539	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,629	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,947	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
6,50	2,40	L1	L2	t	t3	t4
		6,497	1,303	0,201	-0,012	0,157
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		7,300		2,948		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,104	0,205	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,609	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,039	4	9,488	Aceitar H0	
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independência	2,300	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-2,394	Rejeitar Ho, Amostra Não Homogênea				
Estacionaridade	-3,346	Rejeitar Ho, Observações Não Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
8,9	2,8	L1	L2	t	t3	t4
		8,879	1,541	0,174	0,014	0,157
Distribuição teórica ajustada		Locação		Escala		
Weibull-2P (α, β)		9,900		3,522		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,106193	0,205	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,382887	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,685	4	9,488	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 26 - Resultados dos testes estatísticos para vazões mínimas médias de 7 dias, 90 dias e 180 dias da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2022)

Vazão mínima média de 7 dias						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	2,401	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-1,063	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,773	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
39,5	16,4	L1	L2	t	t3	t4
		39,538	9,351	0,236	0,053	0,083
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Weibull-2P (α, β)		44,500		2,585		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,049	0,1687	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,182	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		5,581	5	11,071	Aceitar H0	
Vazão mínima média do Trimestre mais seco (90 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	3,882	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-1,334	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-1,353	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
57,1	19,4	L1	L2	t	t3	t4
		57,055	10,670	0,187	0,038	0,163
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Weibull-2P (α, β)		63,700		3,233		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,074818	0,1713	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,524	0,752			
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		7,116031	5	11,0705	Aceitar H0	
Vazão mínima média do semestre mais seco (180 dias)						
Testes	Estatística do teste	Resultado do Teste - Nível de Significância 0,05				
Independencia	3,655	Rejeitar Ho, Observações dependentes				
Homogeneidade	-0,779	Não Rejeitar H0, Amostra Homogênea				
Estacionaridade	-0,672	Não Rejeitar H0, Observações Estacionárias				
Estatísticas da série						
Média	Desvio-Padrão	MOMENTOS-L E RAZÕES-L				
82,7	27	L1	L2	t	t3	t4
		82,656	15,273	0,185	0,075	0,115
Distribuição teórica ajustada		Localção		Escala		
Weibull-2P (α, β)		92,100		3,381		
Teste de Aderência de KS com $\alpha=0,05$		Dcal	DTab	Teste		
		0,095956	0,17	Aceitar H0		
Teste de Aderência de AD com $\alpha=0,05$		A ²	A ² _{crit,α}	Teste		
		0,459404	0,752	Aceitar H0		
Teste de aderência do Qui ² com $\alpha=0,05$		Estatística	GL	Qui ²	Teste	
		8,536	5	11,071	Aceitar H0	

Fonte: a autora

Quadro 27 - Valores dos quantis associados aos Tempos de retorno (T) para vazões mínimas médias de 7 dias e 90 dias das Estações Inhumas e Ponte Meia Ponte

Distribuição Weibull-2P (α, β)				
Quantis calculados para vazão mínima média				
T	de 7 dias		de 90 dias	
(Anos)	Inhumas	Ponte Meia Ponte	Inhumas	Ponte Meia Ponte
1,01	5,18	80,40	25,32	0,815
1,02	4,80	75,57	23,52	0,734
1,03	4,56	72,53	22,39	0,685
1,04	4,39	70,27	21,56	0,649
1,05	4,25	68,45	20,90	0,621
1,06	4,13	66,92	20,34	0,598
1,07	4,03	65,60	19,86	0,578
1,08	3,94	64,42	19,44	0,561
1,09	3,86	63,37	19,06	0,545
1,1	3,79	62,41	18,72	0,531
1,2	3,30	55,76	16,36	0,439
1,3	3,00	51,60	14,92	0,385
1,4	2,78	48,55	13,87	0,348
1,5	2,61	46,15	13,05	0,319
1,6	2,48	44,17	12,39	0,296
1,7	2,36	42,49	11,83	0,277
1,8	2,26	41,04	11,35	0,262
1,8	2,26	41,04	11,35	0,262
2	2,10	38,62	10,55	0,236
5	1,22	24,91	6,25	0,113
10	0,86	18,64	4,42	0,069
15	0,70	15,82	3,64	0,052
20	0,61	14,11	3,17	0,043
25	0,55	12,91	2,86	0,037
30	0,50	12,02	2,62	0,033
35	0,46	11,31	2,44	0,030
40	0,43	10,73	2,29	0,027
45	0,41	10,25	2,17	0,025
50	0,39	9,84	2,06	0,023
55	0,37	9,48	1,97	0,022
60	0,36	9,16	1,90	0,021
65	0,34	8,88	1,83	0,020
70	0,33	8,63	1,76	0,019
75	0,32	8,40	1,71	0,018
80	0,31	8,19	1,66	0,017
85	0,30	8,00	1,61	0,017
90	0,29	7,82	1,57	0,016
95	0,29	7,66	1,53	0,015
100	0,28	7,51	1,50	0,015
150	0,23	6,42	1,24	0,011
300	0,17	4,90	0,90	0,007
500	0,13	4,02	0,71	0,005
750	0,11	3,44	0,59	0,004
1000	0,09	3,08	0,52	0,003

Fonte: a autora

4.3.2 Análises das vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{95}

Foram calculadas as curvas de permanência das séries de vazões das sete estações selecionadas, mostradas nas Figuras 53 a 59, obtendo-se a vazão de 95%, Q_{95} , a vazão de referência para outorga de usos no estado de Goiás.

No Quadro 28 são apresentados os valores das vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ referentes às sete estações selecionadas.

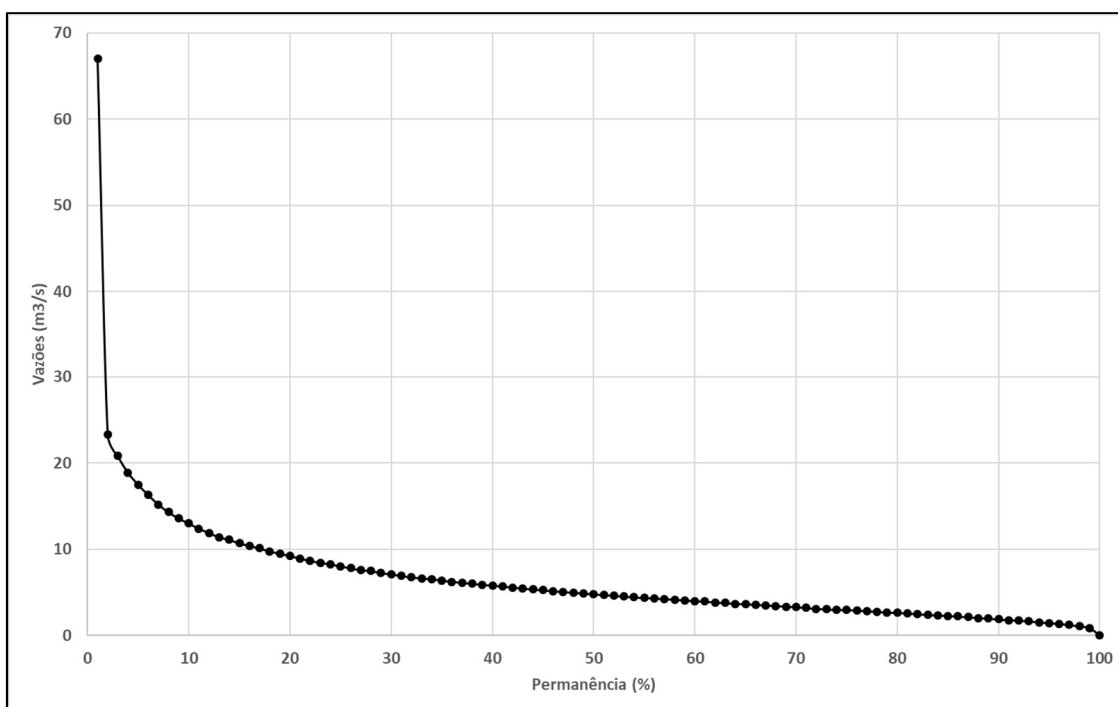
Quadro 28 - Vazões de referência $Q_{7,10}$ e Q_{95} referentes às estações selecionadas

Código	Estação	Rio	Q_{95} (m ³ /s)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)
60635000	Inhumas	Rio Meia Ponte	1,44	0,870
60640000	Montante de Goiânia	Rio Meia Ponte	4,13	1,75
60650000	Jusante de Goiânia	Rio Meia Ponte	9,23	5,27
60653000	Ribeirão das Caldas	Rio das Caldas	0,181	0,069
60654000	Fazenda Sucuri	Rio das Caldas	4,27	2,58
60665000	Professor Jamil	Rio dos Dourados	3,66	2,12
60680000	Ponte Meia Ponte	Rio Meia Ponte	35,2	18,64

Fonte: a autora.

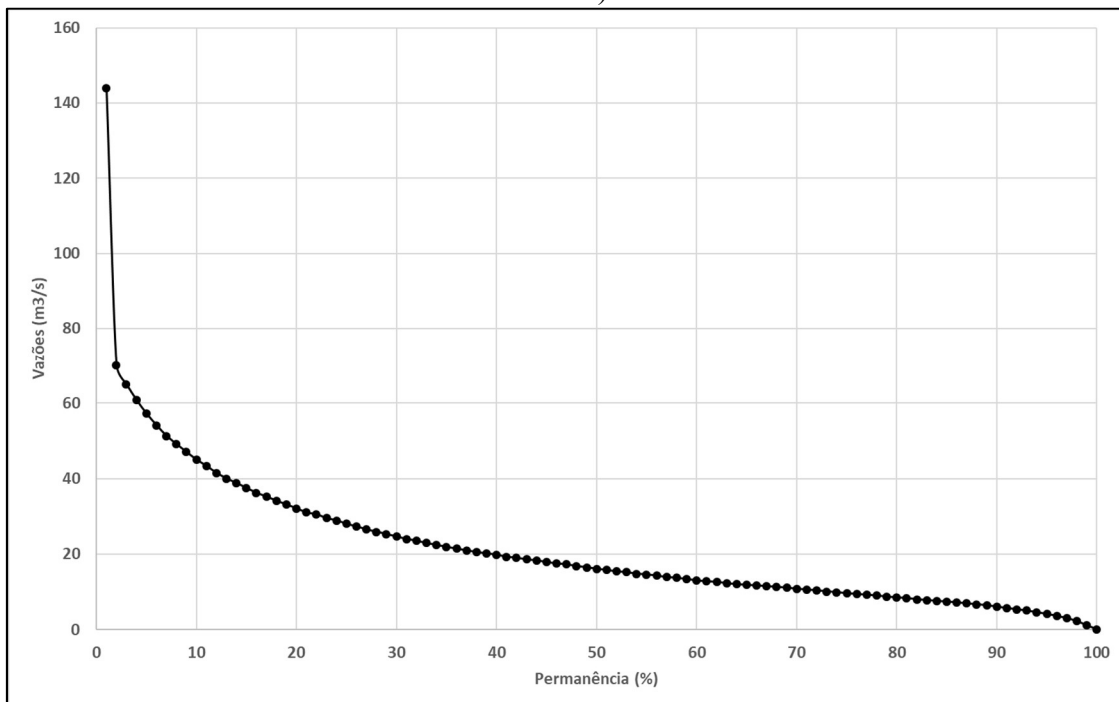
Comparando os valores das vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ percebe-se que a vazão $Q_{7,10}$ é menor, sendo mais restritiva do que a vazão Q_{95} quando usada para outorga de usos em mananciais.

Figura 53 - Curva de Permanência de vazões da Estação Inhumas (1948-2023)



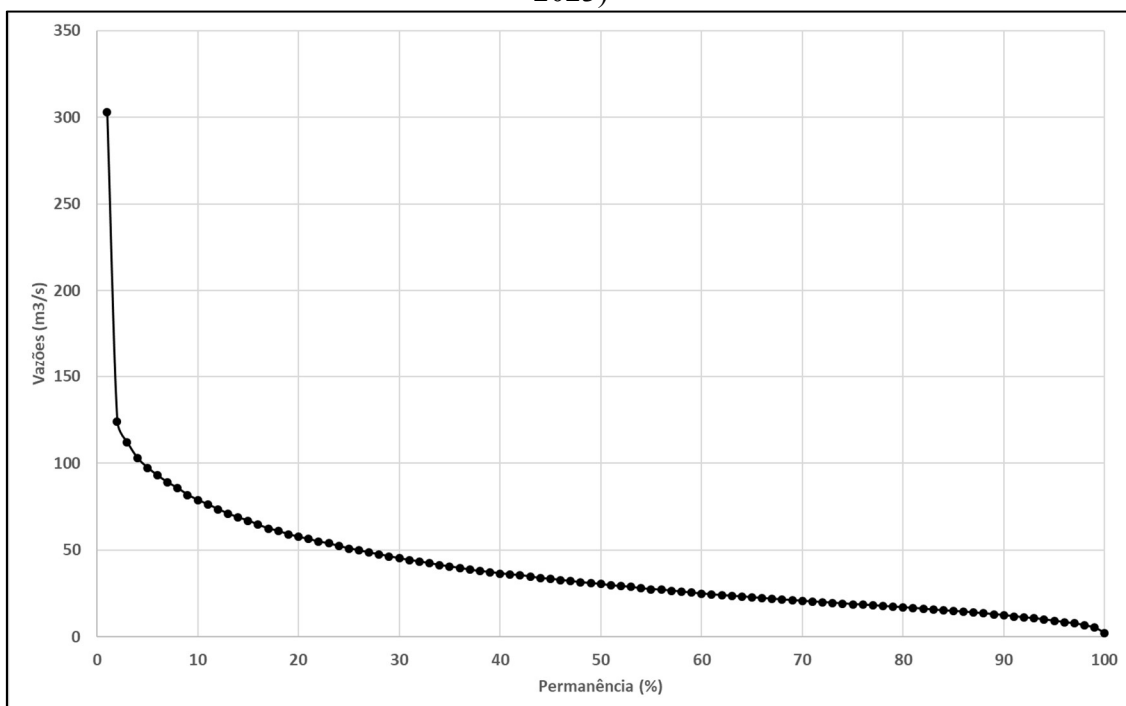
Fonte: a autora.

Figura 54 - Curva de Permanência de vazões da Estação Montante de Goiânia (1974-2023)



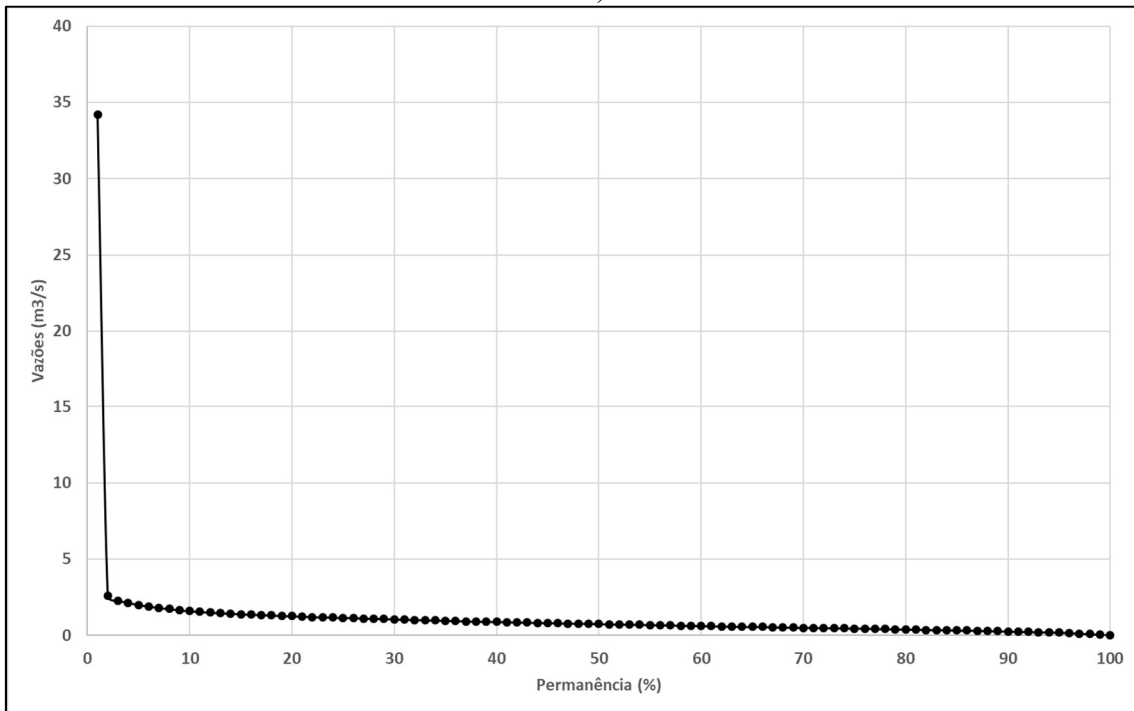
Fonte: a autora.

Figura 55 - Curva de Permanência de vazões da Estação Jusante de Goiânia (1978-2023)



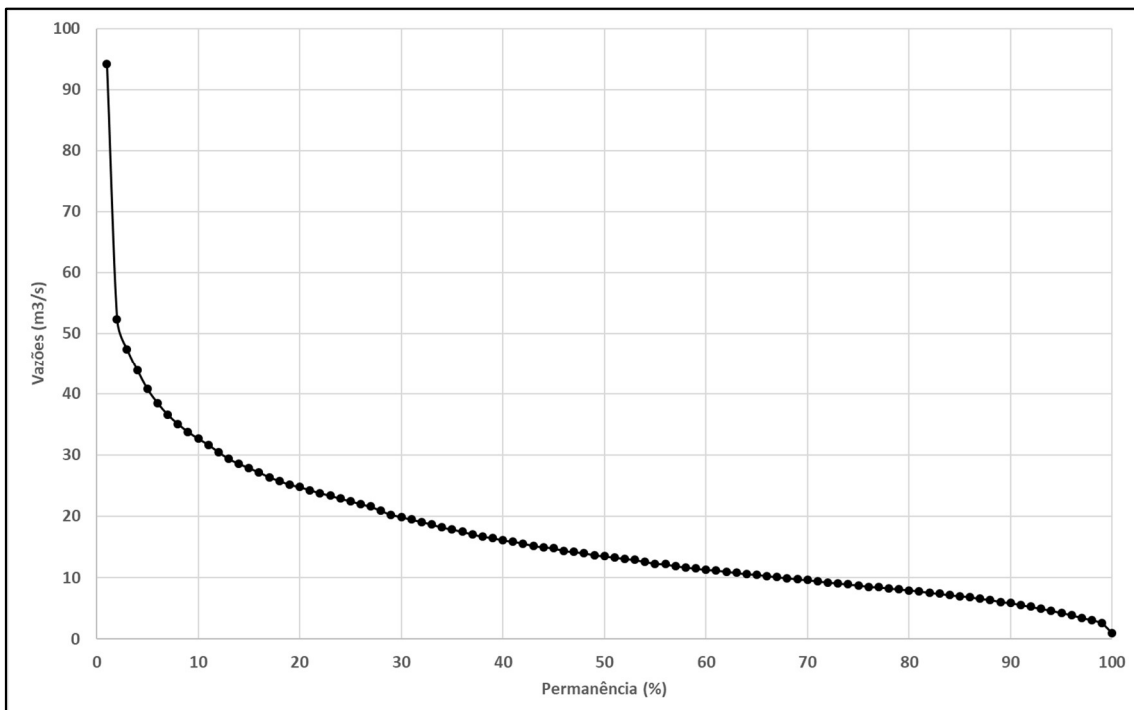
Fonte: a autora.

Figura 56 - Curva de Permanência de vazões da Estação Ribeirão das Caldas (1978-2028)



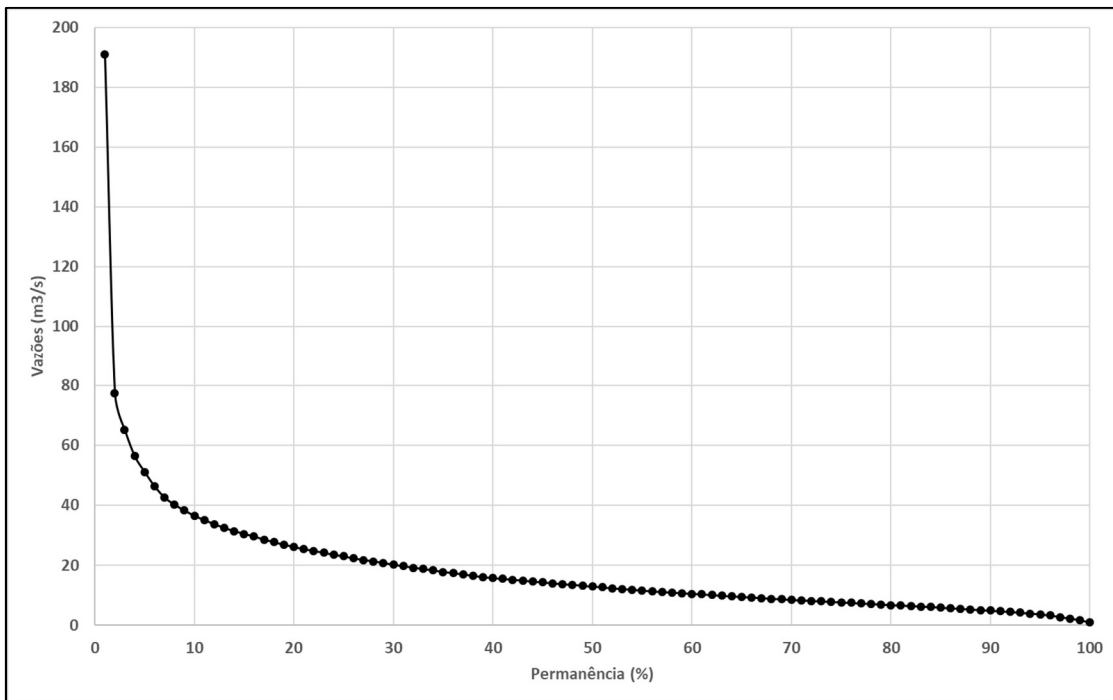
Fonte: a autora.

Figura 57 - Curva de Permanência de vazões da Estação Fazenda Sucuri (1980-2023)



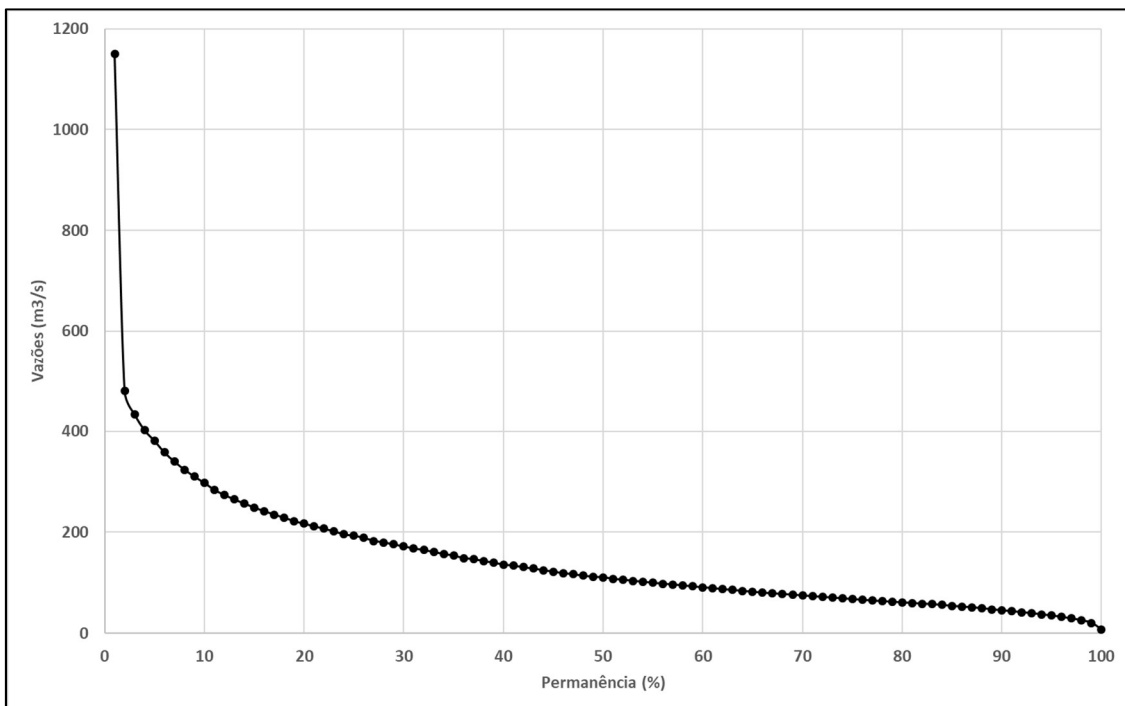
Fonte: a autora.

Figura 58 - Curva de Permanência de vazões da Estação Professor Jamil (1978-2023)



Fonte: a autora.

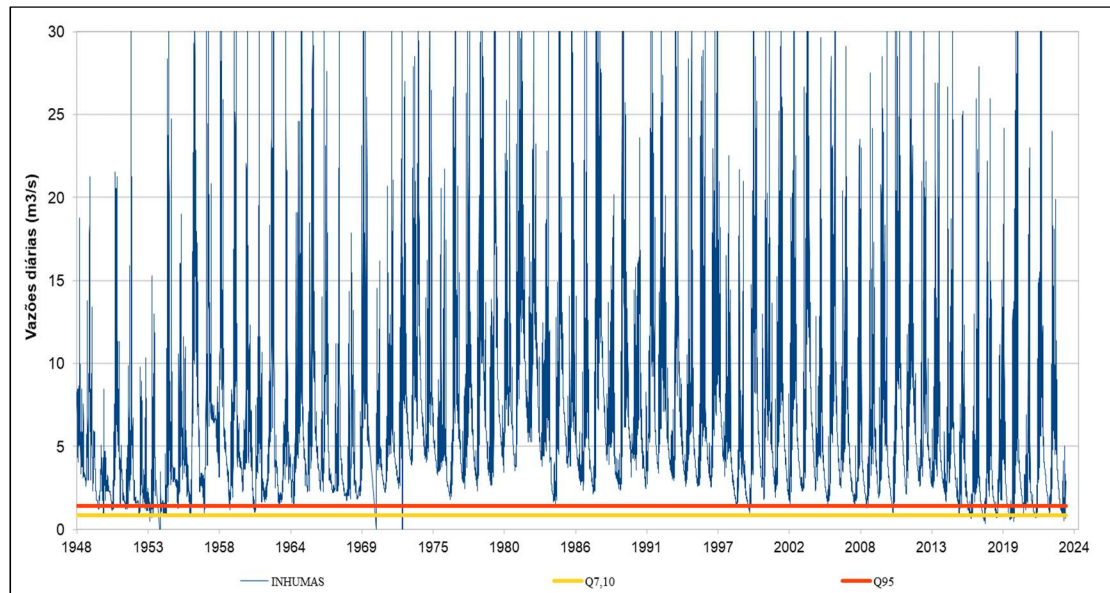
Figura 59 - Curva de Permanência de vazões da Estação Ponte Meia Ponte (1972-2023)



Fonte: a autora.

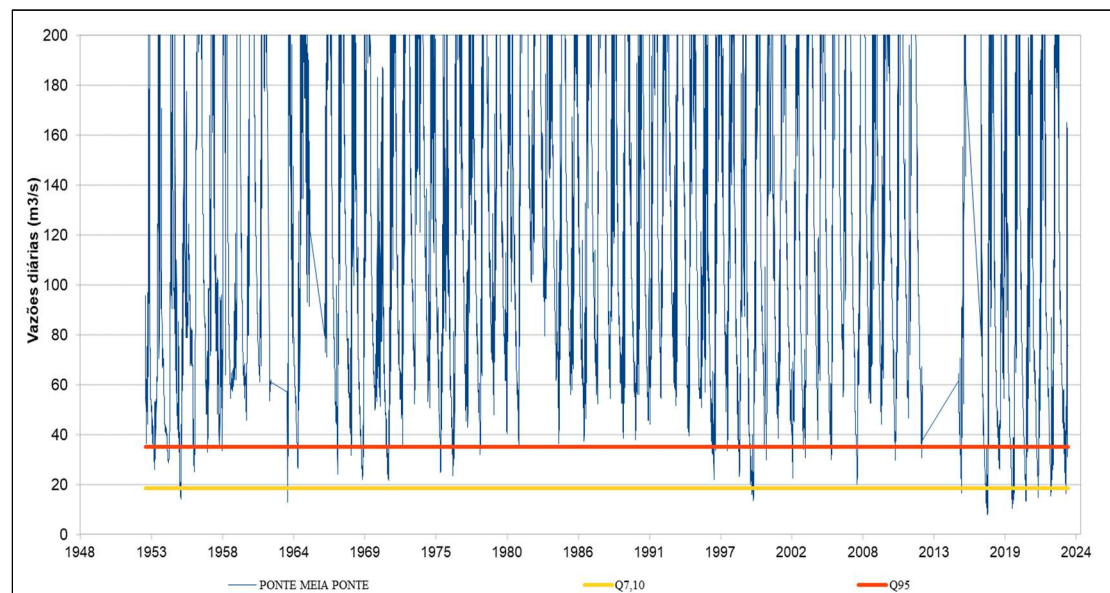
As Figuras 60 e 61 mostram um comparativo dos valores das vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ com as vazões diárias das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte, respectivamente.

Figura 60 - Vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ e vazões diárias de Inhumas (1948-2023).



Fonte: a autora

Figura 61 - Vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$ e vazões diárias de Ponte Meia Ponte (1953-2023)



Fonte: a autora

Para a estação Inhumas (Figura 60), observa-se que os valores diários ficaram abaixo da vazão Q_{95} em vários anos, com destaque para o período de 2015 a 2023. E as vazões diárias ficaram abaixo da vazão $Q_{7,10}$ nos anos de 1953-1954, 1971, 1973, 2016 a 2023.

Para a estação Ponte Meia Ponte (Figura 61) observa-se que os valores diários ficaram abaixo da vazão Q_{95} em vários anos, com destaque também para o período de 2015 a 2023. E as vazões diárias ficaram abaixo da vazão $Q_{7,10}$ nos anos de 1955, 1963, 1999, 2015 a 2023.

Ou seja, os valores diários das vazões do período de 2015 a 2023 ficaram abaixo das vazões de referência, Q_{95} e $Q_{7,10}$ de ambas as estações.

4.3.3 Análise das demandas hídricas

Analisando as características apresentadas da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, e considerando que o Rio Meia Ponte é um dos rios responsáveis pelo abastecimento de aproximadamente 50% da população de Goiânia e Região Metropolitana, pode-se perceber que as principais demandas hídricas são o abastecimento humano e as atividades da agropecuária. Sendo que o maior consumo está concentrado na Região Metropolitana de Goiânia e o consumo rural ao norte da bacia (Goiás, 2023)

Destaca-se na bacia um grande número de barramentos instalados em cursos d'água para diversos usos, com reservatórios e represas artificiais, e para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Sendo que nesta bacia está localizada a represa do Ribeirão João Leite, que também abastece a Região Metropolitana de Goiânia, e a Usina Hidrelétrica de Rochedo, localizada no Rio Meia Ponte, no município de Piracanjuba (IMB, 2017).

De acordo com dados e informações de estudos, as principais interferências que afetam a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea na bacia do Rio Meia Ponte são os problemas de uso e ocupação do solo, relacionados à expansão urbana, com os múltiplos usos dos recursos hídricos, interferências e captações de água irregulares, degradação das Áreas de Preservação Permanente, entorno de nascentes e margens dos mananciais, lançamento de efluentes, poluição difusa e disposição inadequada de resíduos sólidos, bem como carreamento de sedimentos e assoreamento dos mananciais, comprometimento da capacidade de infiltração e de recarga de aquíferos (CBH, 2023; Goiás, 2019).

A demanda total de água para consumo humano na bacia é mostrada no Quadro 29, com maior consumo concentrado na Região Metropolitana de Goiânia. Os valores do consumo rural também são apresentados, com demanda total destinada a pecuária e a agricultura.

E quanto às cargas poluidoras totais (DBO), a carga remanescente é praticamente resultante de origem doméstica, seguidos pela agricultura e pecuária (Goiás, 2023). O Quadro 29 mostra uma comparação entre os valores dos consumos e as cargas poluidoras.

Quadro 29 - Demandas e cargas poluidoras do doméstico, agricultura e pecuária na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte

	Doméstico	Agricultura	Pecuária
Demanda (L/s)	6.351,558	5.556,783	1455,361
DBO - Percentual da origem	99,93*	0,037	0,032
Carga de DBO remanescente (kg/dia)	1285643.581	481.061	406.988

Fonte: Adaptado de Diagnóstico da UPGRH do Rio Meia Ponte – (Produto 2) Versão 7.0 (Goiás, 2023a)

Há queda na qualidade das águas em locais mais expostos à urbanização, devido ao despejo de efluentes não tratados. A região mais crítica da bacia fica localizada na Região Metropolitana de Goiânia, com demanda concentrada muito elevada, onde o abastecimento humano impacta mais no consumo de água, superando a demanda da irrigação (Goiás, 2023).

Observa-se no Quadro 29 que os valores demandados para agricultura irrigada na bacia do Rio Meia Ponte correspondem a 5.556,783 L/s. Considerado que a taxa de consumo da irrigação é de 80%, com taxa de retorno de somente 20%, pode-se perceber o alto consumo dessa atividade.

E de acordo com os dados de ANA (2019), das demandas de uso da água no Brasil em 2017, por finalidade de uso, a irrigação apresentou as maiores demandas: com retirada de 52% e consumo total de 68,4%.

Segundo dados da Agência de Notícias do IBGE, os estabelecimentos com uso de agricultura irrigada cresceram em mais de 50% em 11 anos, justamente o período em que se percebe a maior queda nas vazões mínimas dos rios da bacia (Agência Notícias IBGE, 2020).

De acordo com o painel de monitoramento do Centro de Informações Meteorológicas e Hidrológicas de Goiás para a Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, o Rio Meia Ponte esteve em níveis críticos nos períodos de estiagem dos anos de 2017 até 2023, no ponto de captação para o abastecimento de Goiânia. Sendo que em agosto de 2017 e em setembro de 2019, foram os níveis mais baixos (nível crítico 4), em comparação com a média histórica (Figura 62).

Figura 62 - Níveis críticos do Rio Meia Ponte no período 2017 a 2023

	Entradas em Níveis Críticos						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Nível de Atenção (12000 L/s)	07/05/2017	02/05/2018	07/05/2019	26/06/2020	08/05/2021	03/06/2022	27/06/2023
Nível de Alerta (9000 L/s)	15/05/2017	10/05/2018	14/05/2019	03/08/2020	08/06/2021	16/07/2022	01/08/2023
Nível Crítico 1 (5500 L/s)	12/06/2017	29/06/2018	26/06/2019	12/09/2020	28/07/2021	19/08/2022	22/09/2023
Nível Crítico 2 (4000 L/s)	06/07/2017	27/07/2018	28/07/2019	09/10/2020	18/08/2021	11/09/2022	
Nível Crítico 3 (3000 L/s)	27/07/2017	04/09/2018	15/08/2019		03/09/2021		
Nível Crítico 4 (2000 L/s)	25/08/2017		15/09/2019				

Fonte: Centro de Informações Meteorológicas e Hidrológicas de Goiás (CIMEHGO) (Goiás, 2019).

Situações como essas apresentadas são preocupantes, pois colocam em alerta todos os usos na bacia, ou quem depende desse recurso hídrico, como as atividades de produção de energia e de alimentos. Lembrando que todos os usos estão em cadeia, um dependendo do outro para a sobrevivência de todos.

4.4 RESULTADOS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Foram simuladas vazões com o modelo hidrológico HYMOD, sendo calibrado com os dados de entrada: a série pluviométrica média diária das estações da bacia e a série evaporimétrica da estação Goiânia, com as vazões diárias da estação Ponte Meia Ponte.

Em planilha Excel, os parâmetros foram otimizados e obtidos os valores apresentados no Quadro 30.

Quadro 30 - Parâmetros obtidos do modelo HYMOD - Estação Ponte Meia Ponte

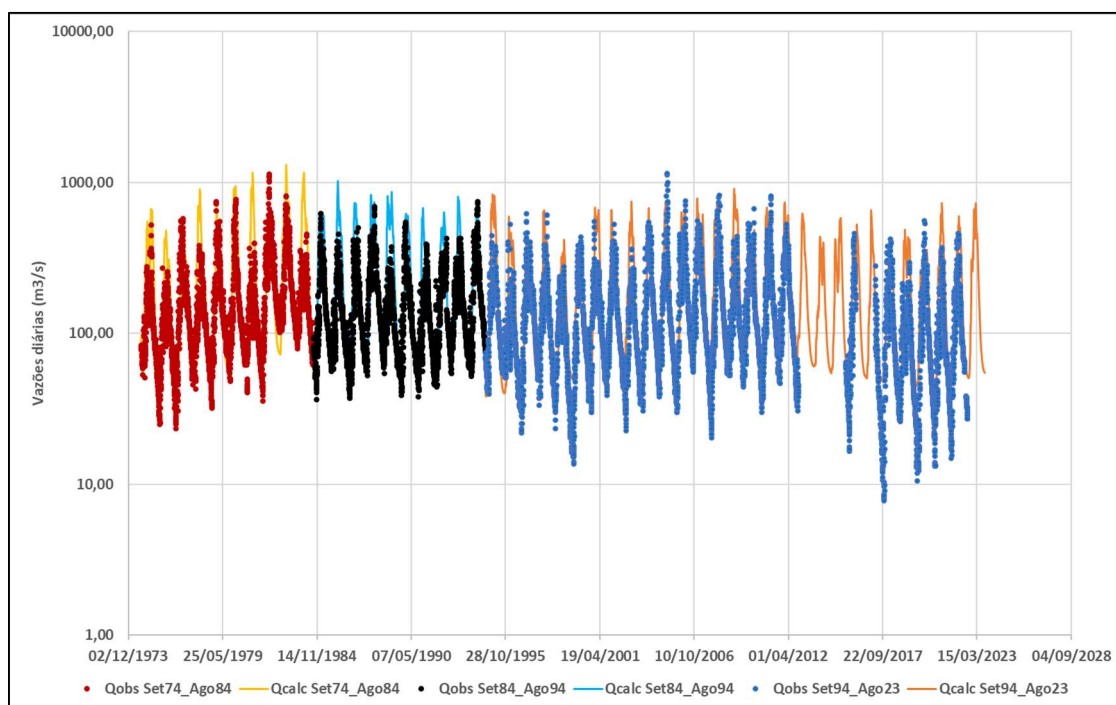
Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor otimizado
Smax	mm	200 a 500	275,17
Beta	(-)	0,1 a 2	0,1719
ALPHA	(-)	0,20 a 1,00	0,258
Rf	dia	0,0 a 0,9	0,0032
Rs	dia	0,0 a 0,1	0,0339

Fonte: a autora

A Figura 63 mostra um gráfico com as vazões observadas e as vazões simuladas (estimadas) da estação Ponte Meia Ponte, nas etapas de:

- Calibração – período de setembro/1974 a agosto/1984 (10 anos)
- Validação – período de setembro/1984 a agosto/1994 (10 anos)
- Análise – período de setembro/1994 a agosto/2023 (20 anos)

Figura 63 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Ponte Meia Ponte



Fonte: a autora

A Figura 63 mostra que as vazões observadas estão mais baixas que as vazões simuladas pelo modelo, em todos os períodos. Principalmente nos anos mais recentes, entre 2000 e 2023, com destaque para o ano de 2017, o mais baixo da série.

Para verificar a eficiência do modelo HYMOD, foi aplicado o coeficiente NSE, sendo encontrados resultados satisfatórios, aplicados aos semestres mais secos (maio a outubro), das vazões simuladas nas três etapas: calibração, validação e análise do modelo. Os valores do NSE foram maiores que 0,70 nas três etapas, indicando que o modelo apresentou eficiência satisfatória, segundo Schaepli e Gupta (2007). O Quadro 31 mostra os valores obtidos do coeficiente NSE, para as vazões simuladas em cada etapa da estação Ponte Meia Ponte.

Quadro 31 - Valores obtidos do coeficiente NSE para as vazões simuladas da estação Ponte Meia Ponte

	Calibração (1974 – 1984)	Validação (1984 – 1994)	Análise (1994 – 2023)
NSE	0,70	0,92	0,80

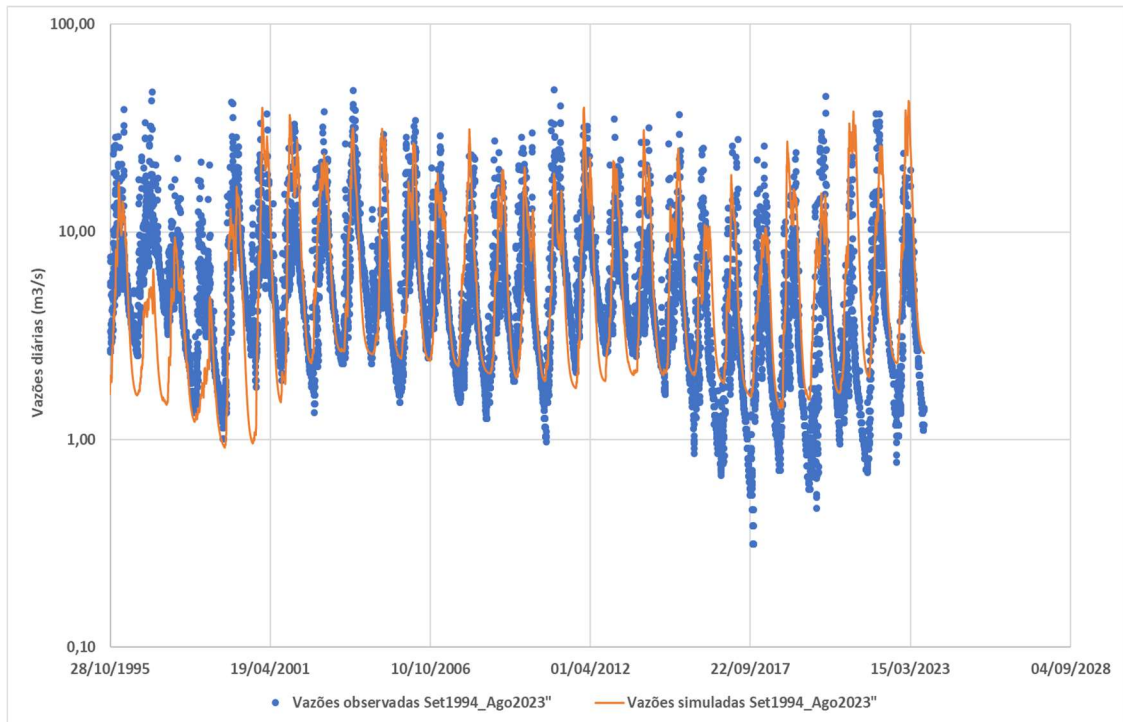
Fonte: a autora

Aplicando o modelo HYMOD com os mesmos parâmetros às demais estações, também foram encontrados resultados satisfatórios com as vazões simuladas.

Para comparação, as Figuras 64 a 69 apresentam as vazões observadas e as vazões simuladas, respectivamente, das estações Inhumas, Montante de Goiânia, Jusante de

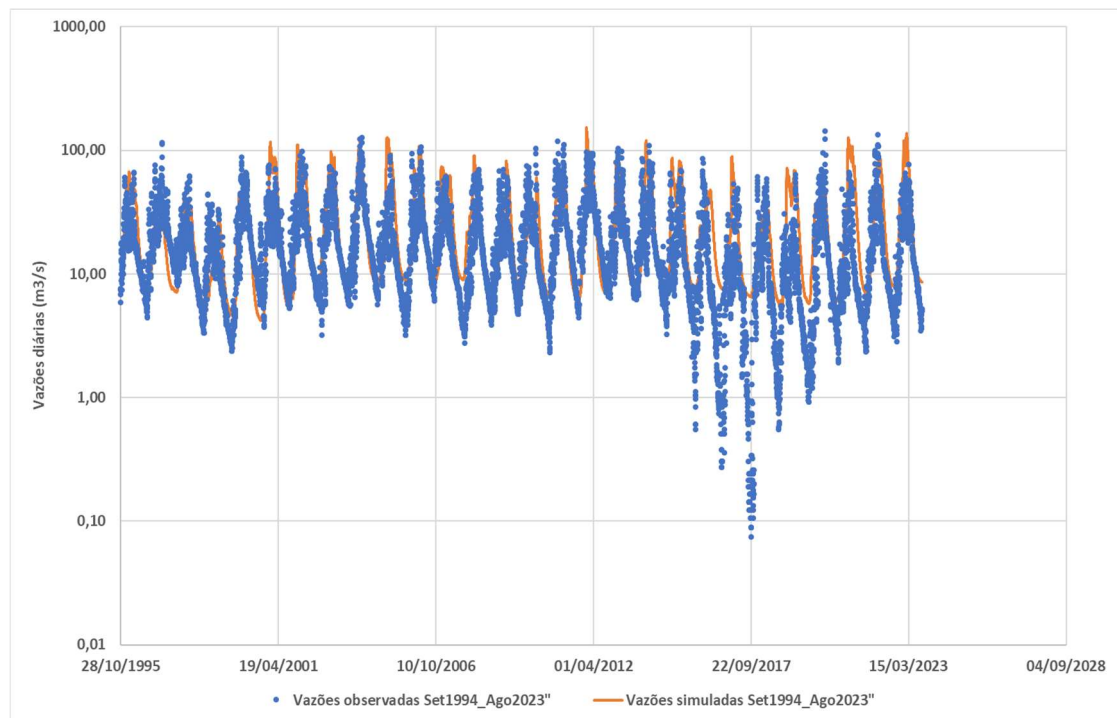
Goiânia, Ribeirão das Caldas, Fazenda Sucuri e Professor Jamil, referentes ao período de análise de cada estação.

Figura 64 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Inhumas



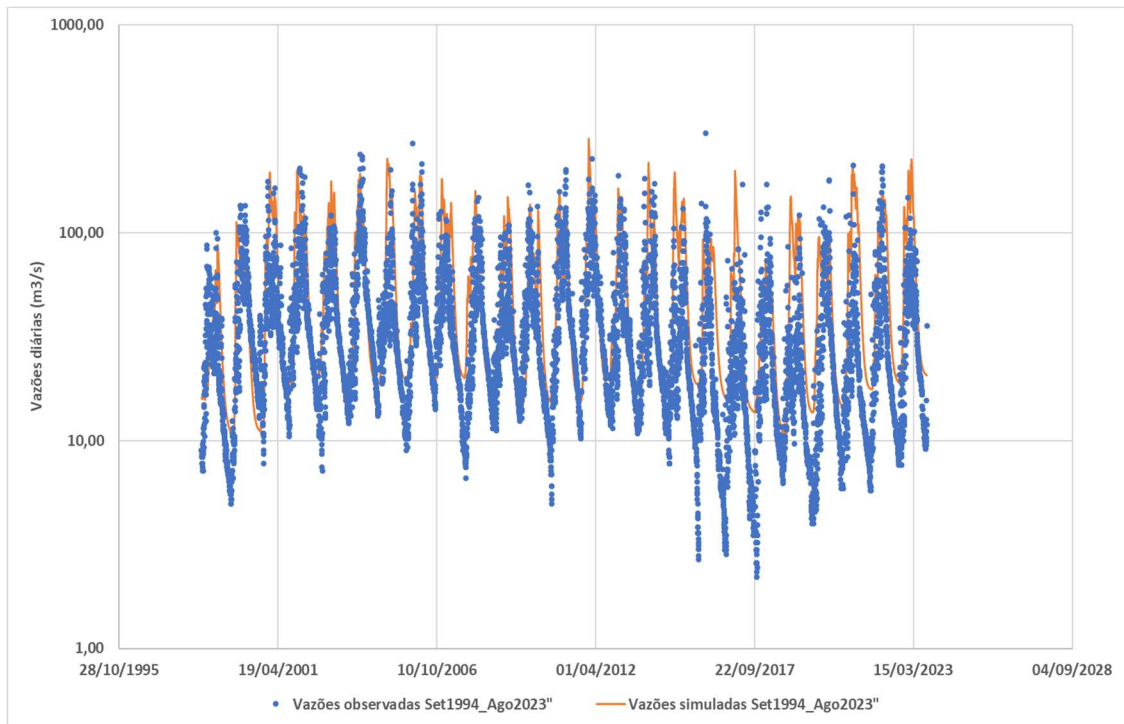
Fonte: a autora

Figura 65 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Montante de Goiânia



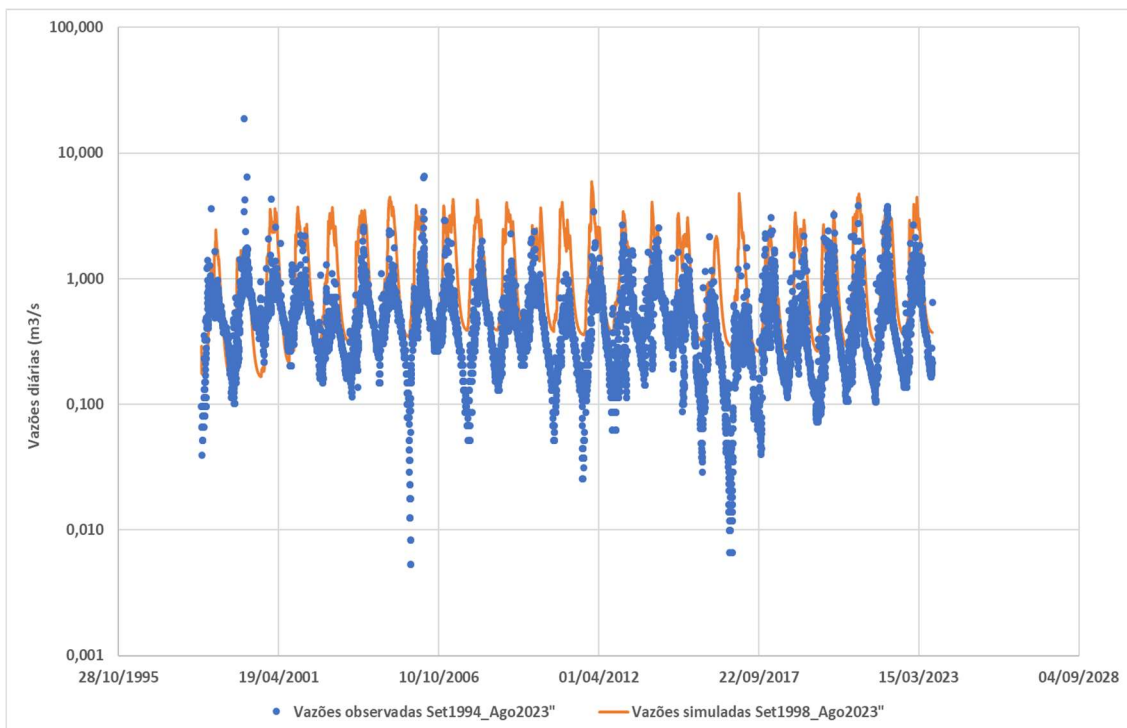
Fonte: a autora

Figura 66 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Jusante de Goiânia



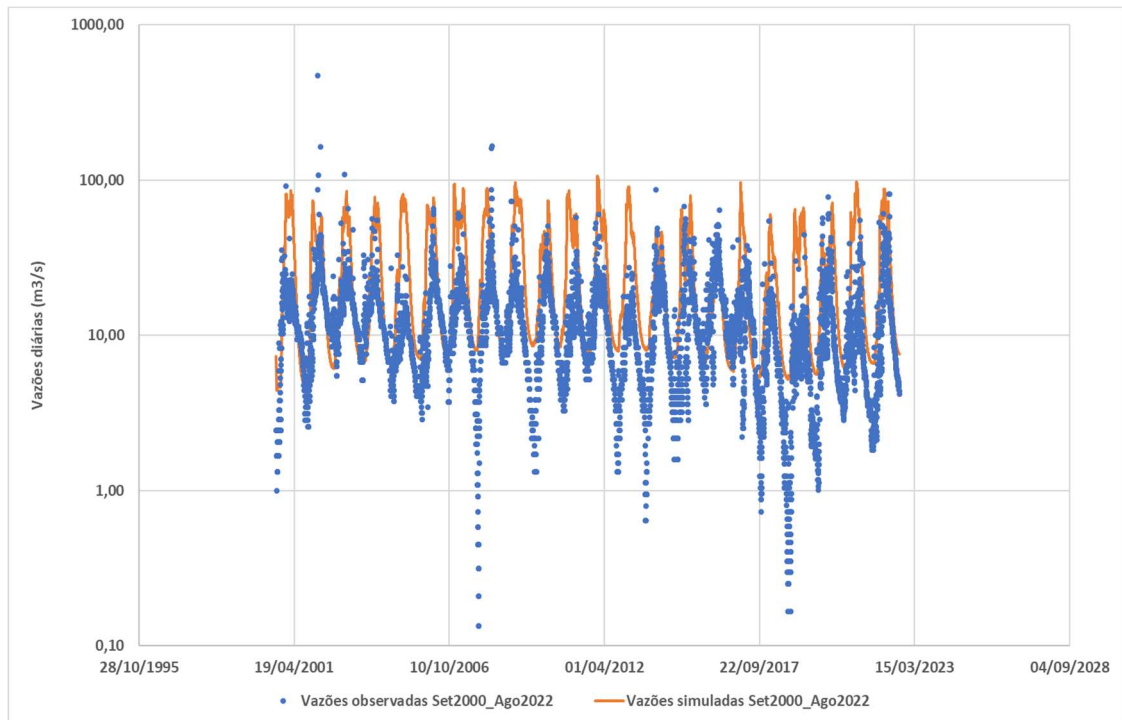
Fonte: a autora

Figura 67 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Ribeirão das Caldas



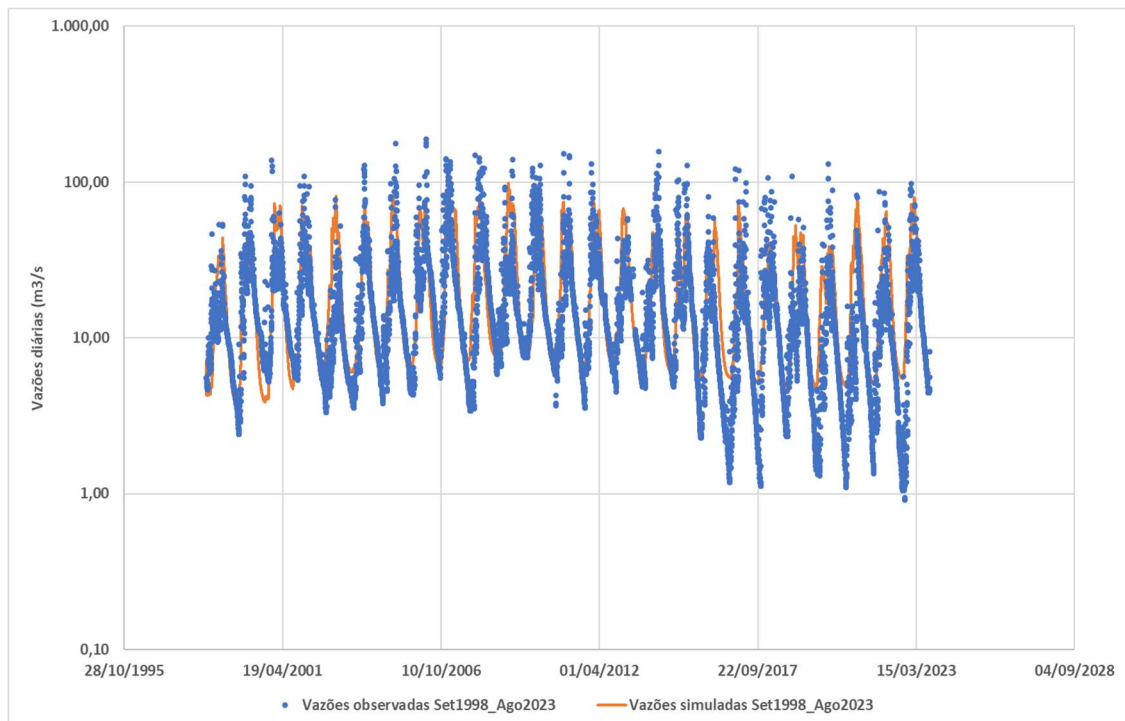
Fonte: a autora

Figura 68 - Vazões observadas e vazões simuladas da estação Fazenda Sucuri



Fonte: a autora

Figura 69 - Vazões observadas e as vazões simuladas da estação Professor Jamil



Fonte: a autora

Pode-se perceber nas Figuras 64 a 69 que as vazões observadas estão mais baixas que as vazões simuladas pelo modelo, principalmente nos anos mais recentes, destacando-se o ano de 2017.

Para as estações situadas no Rio das Caldas Fazenda Sucuri e Ribeirão das Caldas o ano de 2015 apresentou também vazões observadas muito mais baixas que as calculadas.

No Quadro 32 são mostrados os valores obtidos do coeficiente NSE, para as vazões simuladas, sendo acima de 0,7, exceto para das estações Ribeirão das Caldas e Fazenda Sucuri.

Quadro 32 - Valores obtidos para a eficiência NSE para as vazões simuladas das estações selecionadas

Estação	Período da análise	NSE
Inhumas	1994-2023	0,81
Montante de Goiânia	1995-2023	0,83
Jusante de Goiânia	1998-2023	0,86
Ribeirão das Caldas	1998-2023	0,50
Fazenda Sucuri	2000-2022	0,67
Professor Jamil	1998-2023	0,81

Fonte: a autora

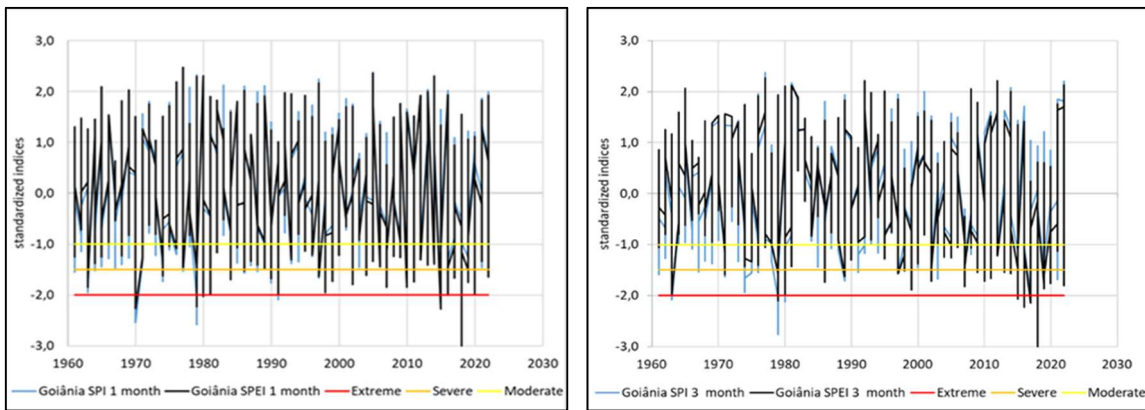
4.5 AVALIAÇÃO DAS SECAS

Os cálculos dos índices de seca: SPI, SPEI e SSI foram obtidos nas escalas de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, para as onze estações pluviométricas e as sete estações fluviométricas em estudo, utilizando o programa da WMO e as ferramentas do programa Rstudio.

Os dois resultados apresentaram pequena diferença. Isso porque o programa da WMO utiliza distribuição de probabilidade log-logística, enquanto que o pacote do Rstudio utiliza a distribuição Gama. Além disso, para entrada no programa da WMO há um arredondamento das casas decimais das séries de dados. Como os resultados das análises estatísticas mostraram que as precipitações se ajustaram melhor à distribuição Gama, foram considerados neste estudo os resultados do Rstudio.

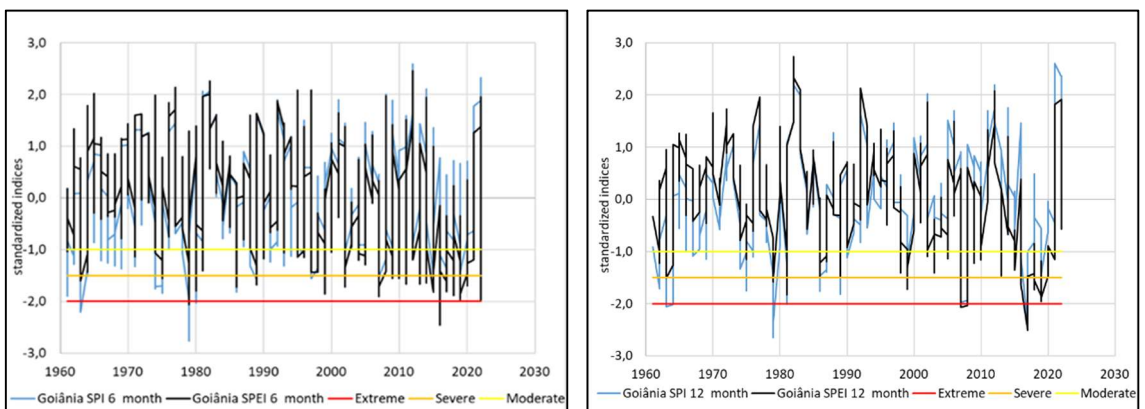
Para comparação, foram gerados gráficos com os resultados dos índices SPI e SPEI da estação Goiânia, período de 1961 a 2022, mostrados na Figura 70.

Figura 70 - Resultados dos índices de seca SPI e SPEI - Estação Goiânia (INMET)



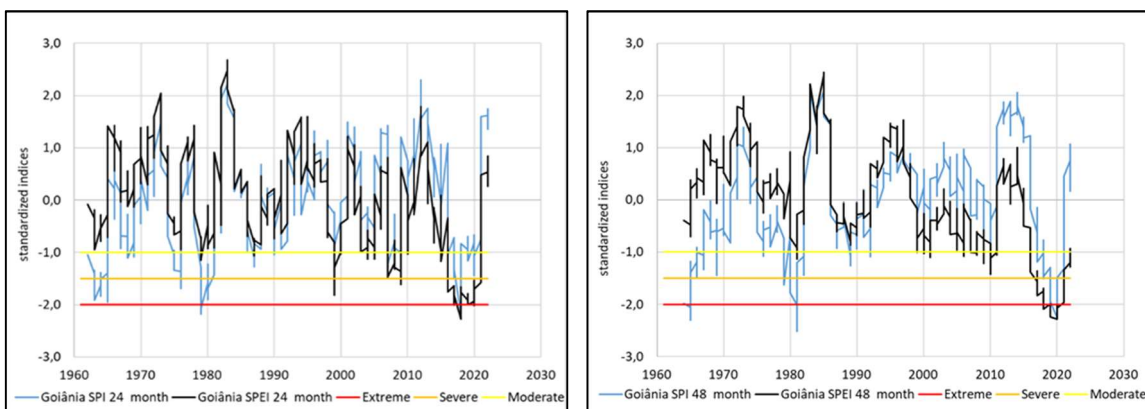
(a) SPI e SPEI na escala 1 mês

(b) SPI e SPEI na escala 3 meses



(c) SPI e SPEI na escala 6 meses

(d) SPI e SPEI na escala 12 meses



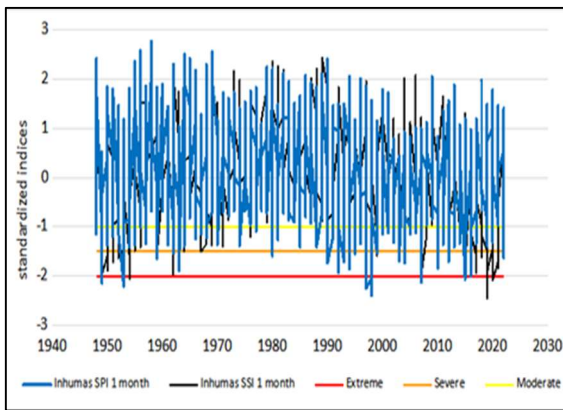
(e) SPI e SPEI na escala 24 meses

(f) SPI e SPEI na escala 48 meses

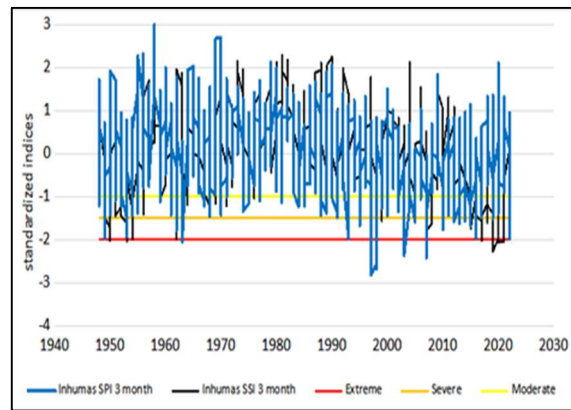
Fonte: a autora

E foram gerados gráficos com os resultados dos índices SPI e SSI, das estações: Inhumas período 1948 a 2022 e Ponte Meia Ponte 1953 a 2022, mostrados nas Figuras 71 e 72, respectivamente.

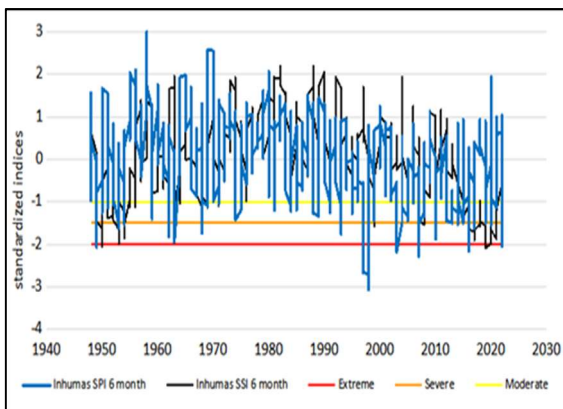
Figura 71 - Resultados dos índices de seca SPI e SSI - Estação Inhumas



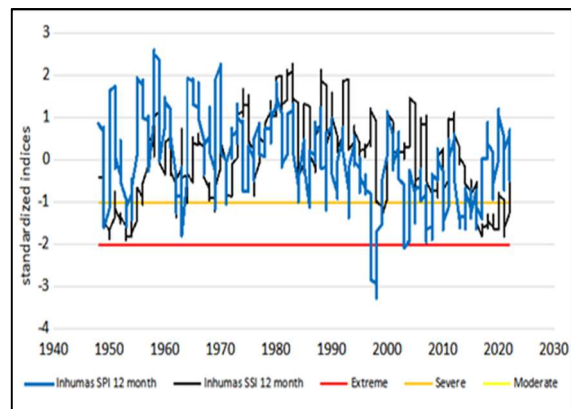
(a) SPI e SSI na escala 1 mês



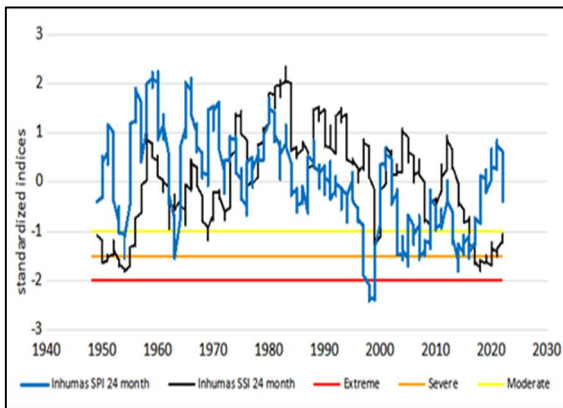
(b) SPI e SSI na escala 3 meses



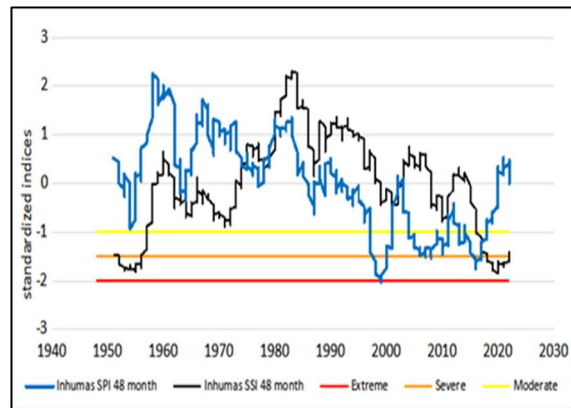
(c) SPI e SSI na escala 6 meses



(d) SPI e SSI na escala 12 meses



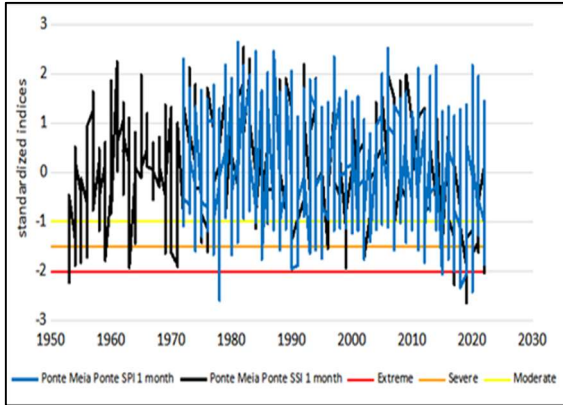
(e) SPI e SSI na escala 24 meses



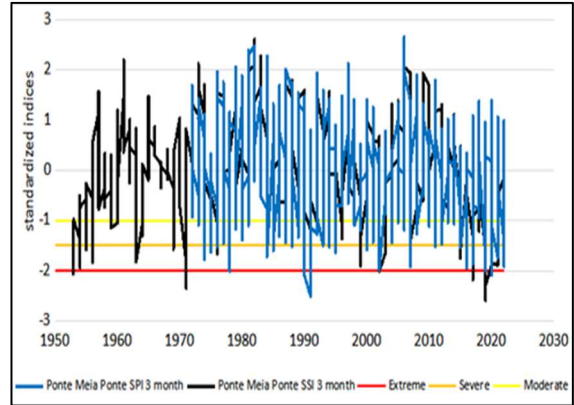
(f) SPI e SSI na escala 48 meses

Fonte: a autora

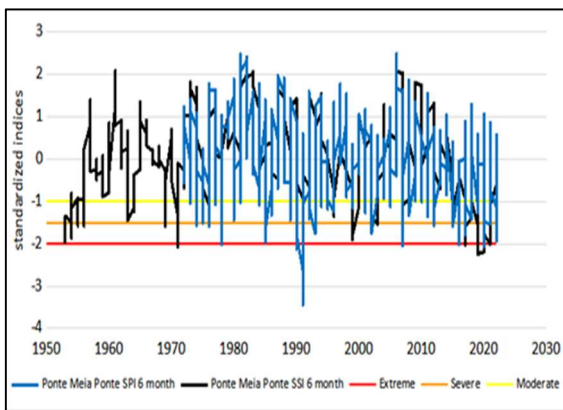
Figura 72 - Resultados dos índices de seca SPI e SSI - Ponte Meia Ponte



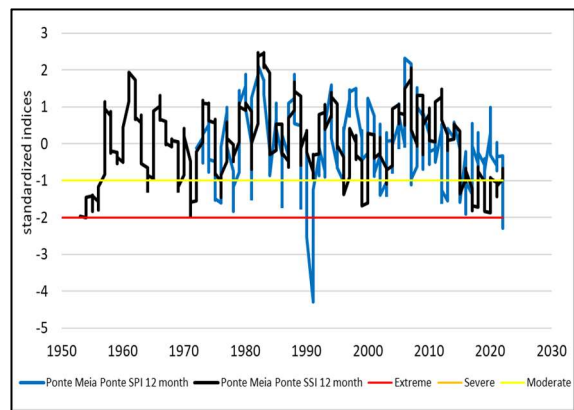
(a) SPI e SSI na escala 1 mês



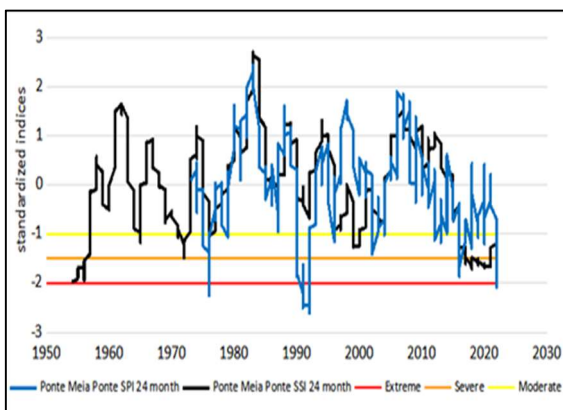
(b) SPI e SSI na escala 3 meses



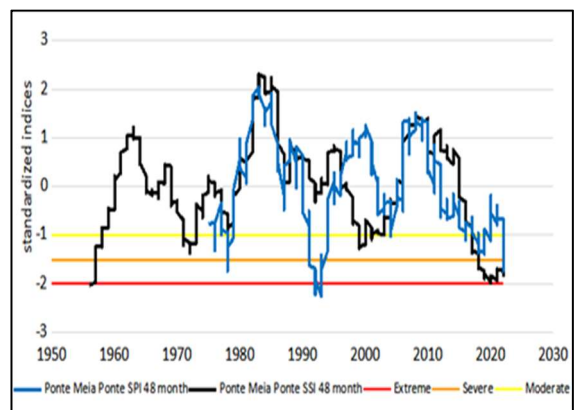
(c) SPI e SSI na escala 6 meses



(d) SPI e SSI na escala 12 meses



(e) SPI e SSI na escala 24 meses



(f) SPI e SSI na escala 48 meses

Fonte: a autora

Nas Figuras 70 a 72 observa-se os anos mais secos, com valores a partir de -1, pois segundo a classificação de McKee et. al. (1993), um evento de seca começa quando o índice de seca atinge um valor igual ou inferior a -1, classificados como moderadamente seco, e dura até que o índice retorne a um valor igual ou superior a zero.

Com os resultados dos índices SPI e SSI foram também gerados gráficos para as demais estações, sendo apresentados nas Figuras A1 a A17 do APÊNDICE A.

Para a avaliação das secas com os três índices: SPEI, SPI e SSI foram considerados os anos classificados como extremamente secos, com valores de -2 ou menos, nas escalas dos 4 tipos das secas.

Para a estação Goiânia com SPI e SPEI:

Seca meteorológica (1 a 3 meses) = anos em torno de 1970, 1979-1980, 1991, 2015-2021.

Seca agrícola (3 a 6 meses) = anos em torno de 1963, 1979-1980, 2015 a 2019.

Seca hidrológica (6 a 12 meses) = anos em torno de 1963, 1979-1980, 2007-2008 e 2016-2019.

Seca socioeconômica (24 a 48 meses) = anos em torno de 1963, 1979, 2017-2019.

Para a estação Inhumas as avaliações foram:

Seca meteorológica (1 a 3 meses) = 1950, 1954-1955, 1963, 1997-1998, 2008, 2015-2021.

Seca agrícola (3 a 6 meses) = 1949-1950, 1954, 1963, 1997-1998, 2008, 2015-2021.

Seca hidrológica (6 a 12 meses) = 1950, 1954, 1997-1998, 2004, 2008, 2017-2019.

Seca socioeconômica (24 a 48 meses) = 1954, 1998, 2019.

Para a estação Ponte Meia Ponte as avaliações foram:

Seca meteorológica (1 a 3 meses) = 1954, 1964, 1978, 1991, 2000, 2007, 2016-2020.

Seca agrícola (3 a 6 meses) = 1954, 1970, 1979, 1991, 2000, 2007, 2017-2020.

Seca hidrológica (6 a 12 meses) = 1954, 1970, 1979, 1991, 2007, 2017-2020.

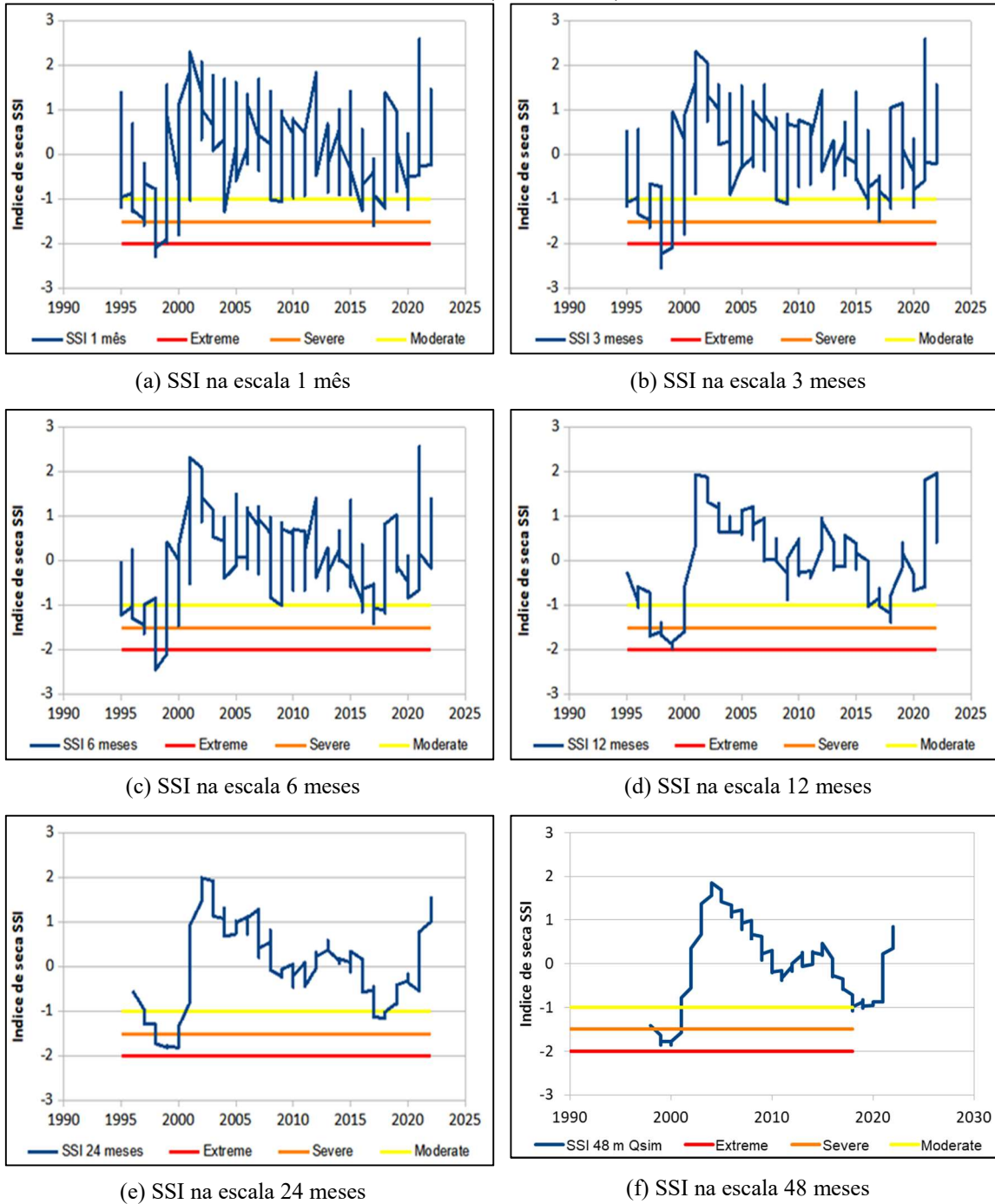
Seca socioeconômica (24 a 48 meses) = 1954, 1979, 1991, 2007, 2017-2020.

Considerando que há uma evolução das secas, iniciando na seca meteorológica até a seca socioeconômica, e que os três índices SPEI, SPI e SSI apresentaram valores de seca extrema (-2) praticamente nos mesmos períodos, pode-se avaliar que houve os quatro tipos de seca nos seguintes períodos: 1954, 1963, 1979, 1991, 1998, 2007, 2017-2019.

Após a simulação das vazões com o modelo hidrológico HYMOD, foram calculados os índices de seca SSI com as vazões simuladas das estações do estudo.

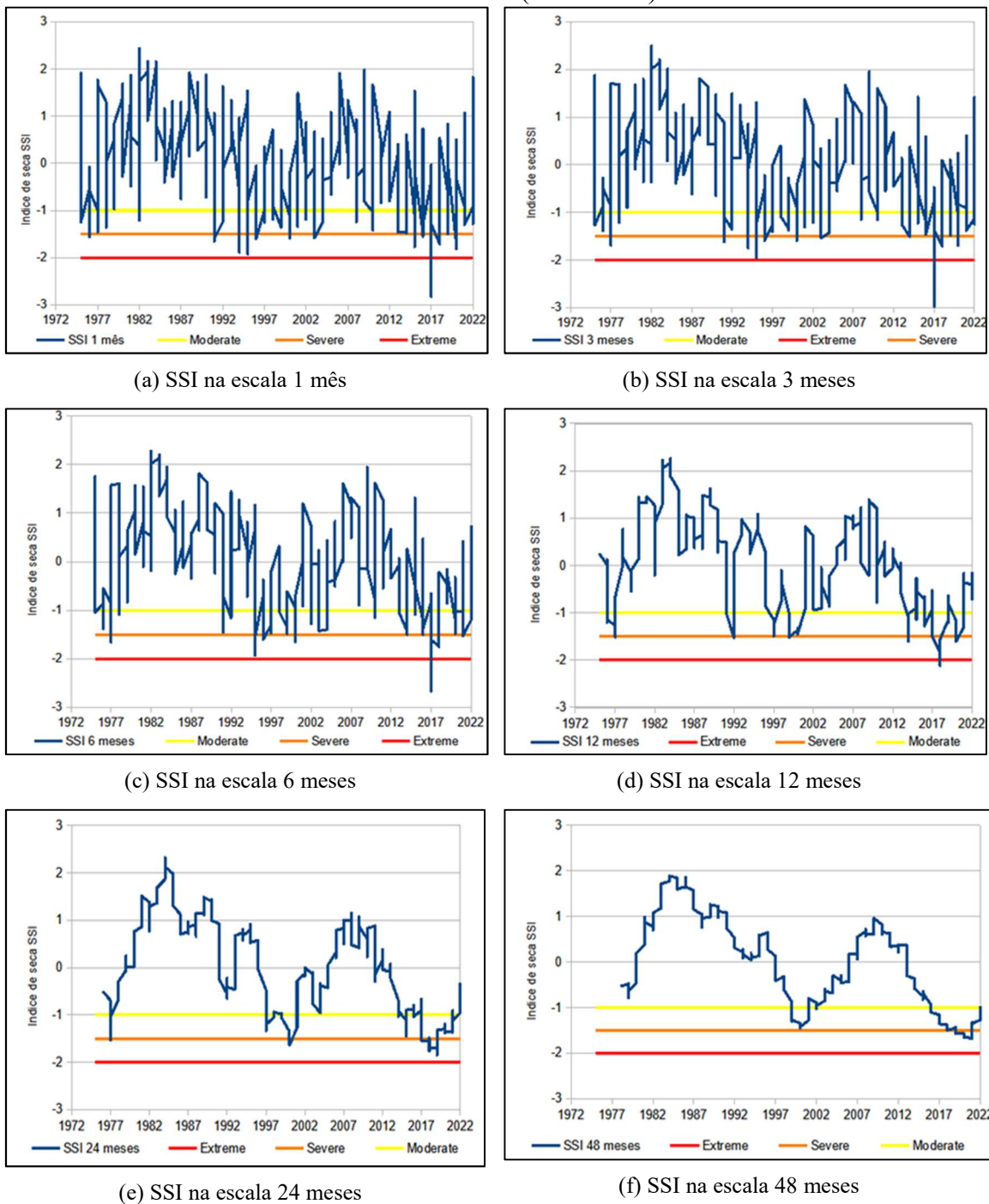
Foram gerados gráficos com os resultados dos índices SSI das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte, mostrados nas Figuras 73 e 74, respectivamente.

Figura 73 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Inhumas com as vazões simuladas (1995-2022)



Fonte: a autora

Figura 74 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ponte Meia Ponte com as vazões simuladas (1974-2023)



Fonte: a autora

Da mesma forma que para as vazões observadas, para a avaliação das secas com o índice de seca SSI calculado com as vazões simuladas das estações Inhumas e Ponte Meia Ponte, foram considerados os anos classificados como extremamente secos, com valores de -2 ou menos, nas escalas dos 4 tipos das secas.

- Para a estação Inhumas as avaliações foram:

Seca meteorológica (1 a 3 meses), Seca agrícola (3 a 6 meses) e Seca hidrológica (6 a 12 meses) = os anos de 1997 e 1998.

Seca socioeconômica (24 a 48 meses) = o período de 1998 a 2000 ficou entre -1,5 e -2.

- Para a estação Ponte Meia Ponte as avaliações foram

Seca meteorológica (1 a 3 meses), Seca agrícola (3 a 6 meses) e Seca hidrológica (6 a 12 meses) = o ano de 2017.

Seca socioeconômica (24 a 48 meses) = o período de 2017 a 2019 ficou entre -1,5 e -2.

Portanto, pode-se considerar que houve seca meteorológica até a seca hidrológica com os dados da estação Inhumas no período de 1997 a 1998, evoluindo para a seca socioeconômica no período de 1998 a 2000.

E para a estação Ponte Meia Ponte, considerando como os dados da bacia toda, houve seca meteorológica até a seca hidrológica no ano de 2017, evoluindo para seca socioeconômica entre 2017 a 2019.

Comparando as avaliações das secas com as vazões observadas e simuladas, os resultados com as vazões observadas mostraram mais anos que atingiram o valor -2 seca Extrema. Enquanto que os resultados com as vazões simuladas somente o período mais recente ficou com valor -2 seca extrema: 1998-2000 para Inhumas e 2017-2019 para Ponte Meia Ponte.

5 CONCLUSÕES

De acordo com informações sobre secas no Brasil, mostradas no item 2.2, foram registradas secas severas em períodos antigos, desde 1723, e no Centro-oeste em anos mais recentes: 1963, 1979 e 1985, 1990, entre 1997 e 1999, 2001, 2007 e 2008, 2015-2020.

Após o histórico das ocorrências na Bacia do Rio Meia Ponte, item 2.3, apresentando relatos sobre períodos de secas, com destaque aos anos críticos de 2017 e 2019. E as consequências devido ao aumento das áreas urbanizadas e das áreas com agricultura irrigada, pode-se perceber o quanto essa bacia vem sofrendo com os impactos dessas ações. Sendo sugeridos alguns caminhos sustentáveis para auxiliar a gestão dos recursos hídricos no equilíbrio dos usos, mostrando opções de adaptação da segurança hídrica com a segurança energética e a alimentar, com ações necessárias e possíveis de serem adotadas na Bacia do Rio Meia Ponte para prevenir a escassez hídrica.

A análise do uso do solo e da água na bacia, mostrou as alterações ao longo dos anos, devido ao aumento das áreas urbanizadas, da industrialização e das retiradas para a agricultura irrigada, com redução da vegetação nativa, as quais demonstram que essas atividades impactaram fortemente os recursos hídricos na Bacia do Rio Meia Ponte.

Houve alterações no regime das chuvas, com redução das precipitações e da umidade relativa, aumento das temperaturas e das taxas de evapotranspiração, ao longo do tempo, provavelmente causadas pelas mudanças climáticas. Tais alterações nas chuvas foram mostradas nos resultados das análises estatísticas, com a não estacionariedade das precipitações e não ajustes às distribuições teóricas de algumas séries de estações, podendo-se concluir que tais alterações afetaram o balanço hídrico da bacia.

Com a análise das vazões mínimas, em que são mostradas reduções nos valores observados, abaixo das vazões de referência Q_{95} e $Q_{7,10}$, e com queda brusca nos anos de 2015 a 2021, foi possível concluir que as vazões foram altamente influenciadas: pela redução das precipitações e pelos usos do solo e da água. Tais alterações também foram demonstradas nos resultados das análises estatísticas, com a não estacionariedade das séries de vazões e não ajustes às distribuições teóricas da maioria das estações. Podendo ser esse conjunto de ações a causa da diminuição nas vazões ao longo do tempo na Bacia do Rio Meia Ponte.

Com a análise das demandas hídricas na bacia, pode-se perceber que as principais demandas são o abastecimento humano, concentrado na Região Metropolitana de Goiânia, e as atividades da agropecuária, ao sul da bacia. E as principais interferências que afetam a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea na bacia do Rio Meia Ponte são os problemas de uso e ocupação do solo, relacionados à expansão urbana e com os múltiplos usos dos recursos hídricos, causando a queda na sua qualidade, devido à queda na quantidade da água dos mananciais da bacia.

Com a modelagem das vazões usando somente um modelo hidrológico, o HYMOD, e com dados de uma estação, foram realizadas estimativas de vazões, encontrando resultados satisfatórios para toda a bacia. Podendo-se conferir os valores que medem a eficiência dos resultados das vazões simuladas, NSE, apresentadas nos Quadros 29 e 30. E pode-se verificar que a seca observada existiu, comparando os valores das vazões observadas abaixo das vazões simuladas. Sendo causada pelos usos da água, principalmente pela irrigação, que reduziram a vazão natural na bacia.

Na avaliação das secas com índices de seca, foi possível identificar os períodos em que ocorreu cada tipo de seca. E uma evolução das secas desde a seca meteorológica até a seca socioeconômica. Inclusive em períodos com as vazões simuladas. Mas as secas se mostraram mais persistentes e com maior frequência nas últimas décadas. Destacando o período de 2015 a 2021. Concluindo serem esses os anos mais críticos das séries históricas, classificados como extremamente secos.

Todas essas informações demonstram a situação crítica que vem sofrendo o Rio Meia Ponte e seus afluentes, ao longo dos anos. Mas podem contribuir para auxiliar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos dessa importante bacia.

5.1 LACUNAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Neste estudo não foram explorados dados e informações para a seca subterrânea, item importante para uma mais completa avaliação de secas, que pode ser tratada como um novo tipo de seca. Portanto, uma lacuna para estudos futuros seria um aprofundamento na avaliação das secas na Bacia do Rio Meia Ponte.

Diversos estudos discutiram os quatro tipos de seca; sendo útil e importante introduzir a seca subterrânea como um tipo que não foi incluído na classificação das secas. Mishra e Singh (2010) consideram que pouca pesquisa foi realizada sobre a ocorrência e a propagação de secas em águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables**. Washington: U. S. Department of Commerce, 1046p. 1965.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de Usos Consultivos de Água no Brasil**. Brasília-DF. ANA, 2019. 75 p.: il. ISBN: 978-85-8210-057-8. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana-manual-de-usos-consuntivos-da-agua-no-brasil.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Oficina sobre Escassez Hídrica e Racionamento Preventivo: A necessária integração entre as políticas de recursos hídricos e de saneamento básico**. Brasília: ANA, 2017. 37 slides. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/com-ar-alocacao-de-agua-e-escassez-hidrica>. Acesso em: 13 jul. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. 130 p. ISBN: ISBN 978-85-8210-051-6. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrrigacao-UsodaAguanaAgricaulturalIrrigada.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2021b. 2. ed. - Brasília: ANA, 130 p. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>. Acesso em: 07 ago. 2024

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021c. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br>. Acesso em: 04 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Microsoft Power BI **Monitoramento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojZmNmMmU0ZTYtYmZiYS00ZTk3LWFIMTMtZjQwMzU1MGQ1Y2E4IiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTQxMGItNDY5YS04YjRkLTY2N2ZjZDFiYWY4OCJ9>. Acesso em: 04 set. 2024.

AMARAL, A. K. N.; ROSA, L. E.; FORMIGA, K. T. M. Estudo do transporte de sedimentos em suspensão ao longo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte—Go. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 15, n. 2, p. 94–113, 2021. DOI: 10.5216/ag.v15i2.66498. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/66498>. Acesso em: 16 jun. 2024.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. **Statement on meteorological drought. Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, p. 771–773, 2004. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/232620669?sourcetype=Scholarly%20Journals>. Acesso em: 21 mai. 2024.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, 49, pp. 756-769, 1954

BASTOLA, S. The regionalization of a parameter of HYMOD, a conceptual hydrological model, using data from across the globe. **HydroResearch**, v. 5, p. 13-21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2022.01.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589757822000014?via%3Dihub>. Acesso em: 21 maio 2024.

BASTOLA, S.; MURPHY, C. Sensitivity of the performance of a conceptual rainfall-runoff model to the temporal sampling of calibration data. **Hydrology Research**, v. 44, n. 3, p. 484-494, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2012.061>.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M.; REIG, F.; LATORRE, B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International journal of climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001-3023, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.

BEVACQUA, A. G. **Padrões espaciais e temporais da propagação de secas meteorológicas para hidrológicas no Brasil**. 2001. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: [https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Mestrado AlenaGonzalezBevacqua.pdf](https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Mestrado%20AlenaGonzalezBevacqua.pdf). Acesso em: 21 maio 2024.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer**. 2 ed. Lancaster: John Wiley & Sons, 2012. 457 p. ISBN: 9780470714591. DOI: 10.1002/9781119951001.

BLAIN, G. C. Extreme value theory applied to the standardized precipitation index. **Acta Scientiarum Technology**, v. 36, n. 1, p. 147-155, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i1.17475>.

BORGES, V. S.; OLIVEIRA, W. N. Análise multitemporal do uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do rio Meia Ponte. **Revista eletrônica de Engenharia Civil [REEC]**, 17, n. 1, pp. 79-93, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/68192>. Acesso em: 07 ago. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Seca histórica na Amazônia 2023 foi 30 vezes mais provável devido à mudança do clima**. [Brasília]: MCTI, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/noticias/seca-historica-na-amazonia-2023-foi-30-vezes-mais-provavel-devido-a-mudanca-do-clima>. Acesso em: 06 abr. 2024.

CADORE, J. S.; TOCHETTO, M. Recursos Hídricos: Panorama geral do setor e perspectivas ao atendimento da Agenda 2030. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 9, n. 3, p. 122-136, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5703347>.

CALLIL, P. M.; OLIVEIRA, L. F. C. de; KLIEMANN, H. J.; OLIVEIRA, V. A. de. Caracterização geomorfométrica e do uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, 433-p. 442, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400014>.

CÂMARA MUNICIPAL DE GOIÂNIA. 2ª EXPEDIÇÃO RIO MEIA PONTE COMEÇA NESTA QUARTA-FEIRA (20). Publicado em 18 de março de 2024. <https://www.goiania.go.leg.br/sala-de-imprensa/noticias/2a-expedicao-rio-meia-ponte-comeca-nesta-quarta-feira-20>. Acesso em: 02 abr. 2024.

CBH RIO MEIA PONTE. **Características**. Disponível em: https://cbhmeiaponte.meioambiente.go.gov.br/?page_id=38. 2023. Acesso em: 25 março 2024.

CBH RIO MEIA PONTE. **Oficina de Avaliação da Implementação do Plano de Bacia do rio Meia Ponte**. Disponível em: <https://cbhmeiaponte.meioambiente.go.gov.br/?p=1569>. Acesso em 3 julho 2024.

CHIEW, F. H. S. Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 4, p. 613-625, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613>.

CLASSIFICAÇÃO climática de Köppen para os municípios brasileiros: Estado de Goiás. Disponível em: <https://koppenbrasil.github.io/>. Acesso em : 3 jun. 2024.

COUTINHO, S. M. V.; SANTOS, D. V.; BURSZTYNC, M.; MARENGOD, J. A.; RODRIGUES-FILHOE, S.; LUCENAF, A. F.; MAIAH, S. M. F. A Abordagem Nexus+ aplicada a estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação à mudança do Clima no Brasil. **Sustainability in Debate-Brasília**, v. 11, n. 3, p. 40-56, 2020. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/download/33514/28546/92687>. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da estiagem na região sudeste do Brasil**: Relatório 1. Belo Horizonte: MME, 2014. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22312/1/secaestiagem_sureg_sp_relatorio_001_2014.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da Estiagem na Região Sudeste**: Relatório 5. Belo Horizonte: MME, 2019. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22327/5/boletim_005_mai_2019.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da Estiagem**: Relatório, 2. Belo Horizonte: MME, 2017. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/secas_estiagens/Relatorios/Belo Horizonte/2017_020-20170904%20-%20164359.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da estiagem na região sudeste do Brasil**: Relatório 1. Belo Horizonte: MME, 2014. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22312/1/secaestiagem_sureg_sp_relatorio_001_2014.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da Estiagem na Região Sudeste**: Relatório 5. Belo Horizonte: MME, 2019. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22327/5/boletim_005_mai_2019.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da Estiagem**: Relatório, 2. Belo Horizonte: MME, 2017. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/secas_estiagens/Relatorios/Belo Horizonte/2017_020-20170904%20-%20164359.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Acompanhamento da Estiagem na Região Sudeste**: Relatório 5. Belo Horizonte: MME, 2019. Disponível em:

https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22327/5/boletim_005_mai_2019.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

CROKER, N.; RIGDON, R.; JONES, J.; DOTTO, C.; DEWAN, A. **Os rios do mundo estão secando devido às condições climáticas extremas**. CNN Published 3:30 AM EDT, Sat August 20, 2022. Disponível em: <https://edition.cnn.com/2022/08/20/world/rivers-lakes-drying-up-drought-climate-cmd-intl/index.html> . Acesso em: 21 maio 2024.

DOMENE, S.; ÁLVARES, M.; AGOSTINI, K.; ALMEIDA, G. N. P. D.; CAMARGO, R. G. M.; CARVALHO, A.; SARAIVA, A. Segurança alimentar: reflexões sobre um problema complexo. **Estudos Avançados**, v. 37, p. 181-206, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2023.37109.012>. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1157788/1/AP-Seguranca-alimentar-2023.pdf>. Acesso em: 21 maio 2024.

EDIJATNO, M. C. Un mode`le pluie-de`bit journalier a` trois paramet`res. **La Houille Blanche** n. 2, p. 113–121, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/1989007>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1051/lhb/1989007?needAccess=true>. Acesso em: 21 maio 2024.

EDIJATNO, N. O. N.; YANG, X.; MAKHLOUF, Z.; MICHEL, C. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. **Hydrological Sciences Journal**, v. 44, n. 2, p. 263–277, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626669909492221>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626669909492221> . Acesso em: 21 maio 2024.

EDWARDS, D. C.; MCKEE, T. B. **Characteristics of 20 th century drought in the United States at multiple time scales**. Fort Collins: Colorado, 1997. 172 p. (Atmospheric Science Paper n. 634 : Climatology Report, n. 97-2). Disponível em: <https://mountainscholar.org/bitstreams/66dc1ef7-ed74-4ee4-bd3b-64a1c57183f1/download>. Acesso em: 21 maio 2024.

ESLAMIAN, S.; ESLAMIAN, F. **Handbook of Drought and Water Scarcity: Principles of Drought and Water Scarcity**. New York: CRC Press, 2017.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DE GOIÁS. Reportagem de 13 de agosto 2018. Disponível em: <https://sistemafaeg.com.br/noticias/faeg-participa-de-decisao-para-enfrentamento-da-falta-de-agua-no-meia-ponte->. Acesso em: 23 mar. 2024.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DE GOIÁS. **Faeg participa de decisão para enfrentamento da falta de água no Meia Ponte**. Notícia de 7 de agosto 2023. Disponível em: <https://sistemafaeg.com.br/noticias/baixo-nivel-do-rio-meia-ponte-apresenta-alerta-para-capital-goiana>. Acesso em: 23 mar. 2024.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. de O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. 48 p. ISSN 1678-9644. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/663874/indices-para-a-quantificacao-da-seca>. Acesso em: 16 jul. 2023.

FERNANDES, V. R.; AMARAL CUNHA, A. P. M. do; PINEDA, L. A. C.; LEAL, K. R. D.; COSTA, L. C.; BROEDEL, E.; MARENGO, J. Secas e os impactos na região sul do

Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561 – 584, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14748>. Acesso em: 21 maio 2024.

GESUALDO, G. C.; OLIVEIRA, P.T. ; RODRIGUES, D. B. B.; GUPTA, H. V. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 12, p. 4955-4968, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-4955-2019>. Acesso em: 21 maio 2024.

GOIÂNIA (Governo). **Plano de Racionamento 2022**: Goiânia – Versão 02 https://www.goiania.go.gov.br/arg/wp-content/uploads/sites/19/2022/09/Plano-de-Racionamento-da-Regi-o-Metropolitana-de-Goi-nia-Vers-o-02-pdf_compressed-1.pdf. Acesso em: 01 abr. 2024.

GOIÁS (estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD. **Caracterização da Bacia**. Publicado em 23 agosto 2019. Disponível em: <https://goias.gov.br/meioambiente/cimehgo-bacia/>. Acesso em 28 jul. 2024.

GOIÁS (estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Planos de Recursos Hídricos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Goiás Afluentes ao Rio Paranaíba**: Diagnóstico da UPGRH do Rio Meia Ponte (Produto 2). Goiânia: UFG:FUNAPE, 2023. Versão 7.0. 2023a. Disponível em: <http://pbapgo.meioambiente.go.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/RT-02-Diagnostico-UPGRH-Rio-Meia-Ponte-V7.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GOIÁS (estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Planos de Recursos Hídricos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Goiás Afluentes ao Rio Paranaíba**. Plano de Ações da UPGRH do Rio Meia Ponte (Produto 4). Goiânia: UFG:FUNAPE, 2023b. Versão 5.0. Disponível em: <http://pbapgo.meioambiente.go.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/RT-04-Plano-de-Acoes-UPGRH-Baixo-Paranaiba-V5.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GOIÁS (estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD. **Crise hídrica – Diretriz**. Disponível em: <https://goias.gov.br/meioambiente/cimehgo-diretriz/>. Acesso em: 22 maio 2023.

GOIÁS (Governo). **Barragem do João Leite garante abastecimento de água em Goiânia**. Goiânia, Publicado em 23 setembro 2021. Disponível em: <https://goias.gov.br/barragem-do-joao-leite-contribui-no-abastecimento-de-agua-de-goiania/#:~:text=O%20Sistema%20Mauro%20Borges%2FJo%C3%A3o,do%20abastecimento%20p%C3%ABblico%20na%20Capital>. Acesso em: 21 maio 2024.

GOIÁS (Governo). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Planos de Recursos Hídricos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Goiás Afluentes ao Rio Paranaíba**: Bases metodológica (Produto 1). Goiânia: UFG:FUNAPE, 2018. Disponível em: <http://pbapgo.meioambiente.go.gov.br/wp-content/uploads/2019/06/RT-01-Bases-Metodologicas.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

GOIS, G.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. de. Modelos teóricos transitivos aplicados na interpolação espacial do Standardized Precipitation Index (SPI) para os episódios de El Niño forte no Estado do Tocantins, Brasil. **Irriga**, v. 20, n. 2, p. 371-387, 2015. Disponível em:

<https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/download/1745/1256/7357>. Acesso em: 21 maio 2024.

GOMES, M. V. R.; VERÓL, A. P. Nexo Água Energia Alimento e Bacias Urbanizadas: Estudo de Planejamento Integrado. *In: ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS*, 4., Rio de Janeiro, 2021. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: PROARQ, 2021. p. 740-753.

GONÇALVES, S. T. N.; VASCONCELOS JUNIOR, F. D. C.; SAKAMOTO, M. S.; SILVEIRA, C. D. S.; MARTINS, E. S. P. R. Índices e metodologias de monitoramento de Secas: Uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, sup. 3, p. 495-511, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/rGqGprMLXW5F66b6R98D98j/>. Acesso em: 21 maio 2024.

GUO, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; WANG, Z. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. **WiresWater**, Wiley Interdisciplinary Reviews, v. 8, ed. 1, e1487, 2021. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/wat2.1487>. Acesso em: 21 maio 2024.

GUSYEV, M.; HASEGAWA, A.; MAGOME, J.; SANCHEZ, P.; SUGIURA, A.; UMINO, H.; TOKUNAGA, Y. Evaluation of water cycle components with standardized indices under climate change in the Pampang, Solo and Chao Phraya basins. **Journal of Disaster Research**, v. 11, n. 1091-1102, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.20965/jdr.2016.p1091>.

HAGHIGHI, A. T.; DARABI, H.; SHAHEDI, K.; SOLAIMANI, K.; KLOVE, B. A. Scenario-Based Approach for Assessing the Hydrological Impacts of Land Use and Climate Change in the Marboreh Watershed, Iran. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 25, p. 41–57, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-019-09665-x>. Acesso em: 21 maio 2024.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **American Meteorological Society**, Washington DC - USA, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>.

HERRERA-FRANCO, G.; BOLLMANN, H. A.; LOFHAGEN, J. C. P.; BRAVO-MONTERO, L.; CARRIÓN-MERO, P. Approach on water-energy-food (WEF) nexus and climate change: A tool in decision-making processes. **Environmental Development**, v. 46, 100858, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100858>. Acesso em: 21 maio 2024.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis - An Approach Based on L-Moments**, 224 p. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Estabelecimentos com uso de agricultura irrigada crescem em mais de 50% em 11 anos. 17.01.2020. **Agência Notícias IBGE**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/26684-estabelecimentos-com-uso-de-agricultura-irrigada-crescem-em-mais-de-50-em-11-anos>. Acesso em: 07 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Síntese descrição biomas**. 07.11.2023.

https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomas/documentos/Sintese_Descricao_Biomas.pdf . Acesso em: 09 set. 2024.

INSTITUTO MAURO BORGES DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. IMB. Secretaria Geral da Governadoria – Governo do Estado de Goiás. **Sobre Goiás. Visão Geral.** 2020. Disponível em: <https://goias.gov.br/imb/wp-content/uploads/sites/29/2018/07/goias-visao-geral-7fb.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

INSTITUTO MAURO BORGES DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. IMB. Secretaria Geral da Governadoria – Governo do Estado de Goiás. **Sobre Goiás. Mapeamento de espelhos d'água do Estado de Goiás e Distrito Federal – Ano 2016.** 2017. Disponível em: <https://goias.gov.br/imb/wp-content/uploads/sites/29/2017/08/14-mapeamento-de-espelhos-d-agua-do-estado-de-goias-e-distrito-federal-de-2016-201708-c27.pdf> . Acesso em: 1 ago. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br>. Acesso em: 1 ago. 2024.

JORNAL DAQUI. **Rio Meia Ponte tem 490 em fila parada para captação de água.** Reportagem de 03.06.2023. 2023a. Disponível em: <https://daqui.opopular.com.br/editorias/geral/rio-meia-ponte-tem-490-em-fila-parada-para-capta%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua-1.2665543>. Acesso em 23 mar. 2024.

JORNAL DAQUI. **Rio que é opção de água para região metropolitana de Goiânia já está degradado.** Reportagem de 04.08.2023. 2023b. Disponível em: <https://daqui.opopular.com.br/editorias/geral/rio-que-%C3%A9-op%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua-para-regi%C3%A3o-metropolitana-de- Goi%C3%A2nia-j%C3%A1-est%C3%A1-degradado-1.2692154>. Acesso em: 01 abril 2024.

JORNAL OPÇÃO. **Começa a 2ª. edição da Expedição Rio Meia Ponte.** Reportagem de 19 março 2024. Disponível em: <https://www.jornalopcao.com.br/meio-ambiente/comeca-a-2a-edicao-da-expedicao-rio-meia-ponte-590464/>. Acesso em: 02 abr. 2024.

JORNAL OPÇÃO. **Expedição no rio Meia Ponte recolhe 12 toneladas de lixo no primeiro dia.** Reportagem de 20 setembro 2023. Disponível em: <https://www.jornalopcao.com.br/goiania/expedicao-no-rio-meia-ponte-recolhe-12-toneladas-de-lixo-no-primeiro-dia-532222/> . Acesso em: 02 abr. 2024.

JORNAL UFG. **2ª. Expedição Rio Meia Ponte começa nesta quarta-feira (20).** Reportagem de 18/03/24. Disponível em: <https://www.goiania.go.leq.br/sala-de-imprensa/noticias/2a-expedicao-rio-meia-ponte-comeca-nesta-quarta-feira-20> . Acesso em: 02 abr. 2024.

JORNAL UFG. **UFG participa da 1ª. expedição Rio Meia Ponte.** Reportagem de 04/04/23. Disponível em: <https://jornal.ufg.br/n/168170-ufg-participa-da-1-expedicao-rio-meia-ponte> . Acesso em: 23 mar. 2024.

JORNAL UFG. **É possível recuperar o rio Meia Ponte?** Reportagem de 29/11/12. Disponível em: <https://jornal.ufg.br/n/41689-e-possivel-recuperar-o-rio-meia-ponte> . Acesso em: 23 mar. 2024.

JORNAL UFG. **Equipe técnica da UFG apresenta diagnóstico sobre recursos hídricos do Rio Meia Ponte.** Reportagem de 18/09/20. Disponível em:

<https://jornal.ufg.br/n/133650-equipe-tecnica-da-ufg-apresenta-diagnostico-sobre-recursos-hidricos-do-rio-meia-ponte>. Acesso em: 23 mar. 2024.

JUNQUEIRA, R. **Índices de severidade de seca para a bacia hidrográfica do rio Tocantins**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/33453>. Acesso em: 21 maio 2024.

JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; AMORIM, J. D. S.; MELLO, C. R. D. Hydrological response to drought occurrences in a Brazilian savanna basin. **Resources**, v. 9, n.10, p. 123, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources9100123>.

KANG, W.; SRIDHAR, V. Improved Drought Prediction Using Near Real-Time Climate Forecasts and Simulated Hydrologic Conditions. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 1799, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10061799> .

KOCH, H.; LIERSCH, S.; DE AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, A. L. C.; HATTERMANN, F. F. Assessment of observed and simulated low flow indices for a highly managed river basin. **Journal Hydrology Research**, v. 49, n. 6, p. 1831-1846, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2018.168>. Disponível em: <https://iwaponline.com/hr/article/49/6/1831/41218/Assessment-of-observed-and-simulated-low-flow>. Acesso em: 21 maio 2024.

LAN, T.; LIN, K. R.; LIU, Z. Y.; ELE, Y. H.; XU, C. Y.; ZHANG, H. B.; CHEN, X. H. A clustering preprocessing framework for the subannual calibration of a hydrological model considering climate-land surface variations. **Journal Water Resources Research**, v. 54, ed. 12, p. 10.034-10.052, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023160>.

LOMBARDI, L.; TOTH, E.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A.; BRATH, A. Calibration of a rainfall-runoff model at regional scale by optimising river discharge statistics: Performance analysis for the average/low flow regime. **Physics and Chemistry of the earth**, v. 42-44, p. 77-84, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.05.013>.

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

MAPBIOMAS Brasil. **Mapeamento da superfície de água no Brasil. Brasil ganha 1,7 milhão de hectares de água em 2022, mas continua secando**. 2023a. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/02/15/brasil-ganha-17-milhao-de-hectares-de-agua-em-2022-mas-continua-secando/>. Acesso em: 02 Dez. 2023.

MAPBIOMAS Brasil. **Coleção 7.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2023b. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 14 out. 2023.

MAPBIOMAS Brasil. **Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2023c. Disponível em: <https://mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em 10 mai. 2023.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scale. *In*: PROCEEDINGS OF THE EIGHTH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179–184. **Anais** [...]. Disponível em:

https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf. Acesso em: 23 maio 2024.

MEDEIROS, G. C. S. de. **Metodologia de avaliação da seca hidrológica sob a perspectiva da demanda hídrica**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21572/1/GiovanaCristinaSantosDeMedeiros DISSERT.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2024.

MELLO, L. T. A. de; PINTO, E. J. de A. **Acompanhamento das vazões da bacia do rio Tocantins**: Relatório 1. Goiânia: CPRM, 2021. II. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22302/1/estiagem_bacia_riocantins_relatorio_jul_001_2021.pdf. Acesso em: 23 maio 2024.

MELO, D. C. de R.; VEIGA, A. M.; DE PAULA, T. L. F.; PONCE, J. P. P. de O. A importância da hidrogeologia nos estudos de vazões superficiais. Estudo de caso no Rio Teles Pires. *In.*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., Bento Gonçalves – RS, 2013. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. ISSN: 2318-0358. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=66&fPalavra=PAP012795>. Acesso em: 09 set. 2024.

MISHRA, A.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of hydrology**, v. 391, p. 202-216. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>. Disponível em: https://eclass.emt.ihu.gr/modules/document/file.php/FD104/JOH_A%20review%20of%20drought%20concepts_8_30_10.pdf. Acesso em: 23 maio 2024.

MODARRES, R. Streamflow drought time series forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, p. 223 – 233, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. ISBN 9788574990231. 561 p.

NASCIMENTO, N. O. **Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-debit à l'échelle d'un bassin versant**. Paris. 550f. Tese (Doutorado) - Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement - CERGRENE/ENPC, Paris, France, 1995. Disponível em: <http://twixar.me/pPCm>. Acesso em: 23 maio 2024.

NASH, J. E., SUTCLIFF J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, 282-290, 1970.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. As World Warms, Water Levels Dropping In Major Rivers. **ScienceDaily**, Retrieved, July 16, 2009. Disponível em: www.sciencedaily.com/releases/2009/04/090421101625.htm. Acesso em: 23 maio 2024.

NAZARENKO, S.; MEILUTYTÉ-LUKAUSKIENÉ, D.; ŠARAUSKIENÉ, D.; KRIAUCIŪNIENÉ, J. Spatial and temporal patterns of low-flow changes in lowland rivers. **Water**, v. 14, n. 5, p. 801, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14050801>.

NERC. Flood Studies Report, Vol. 1. London: National Environmental Research Council, 1975.

NDLOVU, M. S.; DEMLIE, M. Assessment of Meteorological Drought and Wet Conditions Using Two Drought Indices Across KwaZulu-Natal Province, South Africa. **Journal Atmosphere**, v. 11, n. 3, p. 623, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11060623>.

NUCADA, M. K.; BARREIRA, C. C. M. Rio Meia Ponte e Córregos que Serpenteiam a Cidade de Goiânia. **Mosaico: Revista de História**, Goiânia, v. 1, n. 2, p. 206–214, 2008. Disponível em: <https://seer.pucgoias.edu.br/index.php/mosaico/article/view/580>. Acesso em: 29 mar. 2024.

O POPULAR. **Especial Meia Ponte**: um rio sedento. Reportagem de 08.10.2017. Disponível em: <https://opopular.com.br/especial-meia-ponte-um-rio-sedento-1.1364541>. Acesso em: 23 mar. 2024.

O POPULAR. **Mais de 20 quilômetros de drenos são encontrados na bacia do Rio Araguaia, diz delegado**. Reportagem de 30.04.2019. Disponível em: <https://opopular.com.br/cidades/rio-meia-ponte-esta-sob-alerta-hidrico-1>. 1788164. Acesso em: 29 mar. 2024.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; GOIS, G.; BRITO, T. T.; MOURA, N. S. H. Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do índice de seca IPP no estado de Alagoas. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 101-112, 2012. Disponível em: <https://www.floram.org/article/10.4322/floram.2012.011/pdf/floram-19-1-101.pdf>. Acesso em: 23 maio 2024.

ORTEGA-GÓMEZ, T. O.; PÉREZ-MARTÍN, M. A.; MONREAL, T. E. Improvement of the drought indicators system in the Júcar River Basin, Spain. **Journal Science of the Total Environment**, Valencia, v. 610-611, p. 276-290, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.250>.

PANOFISKY, H. A.; BRIER, G. W. Some Applications of Statistics to Meteorology. Earth and Mineral Sciences Continuing Education, **College of Earth and Mineral Sciences**, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 224 pp. 1958.

PANU, U. S; SHARMA, T. C. Desafios na pesquisa sobre seca: algumas perspectivas e direções futuras. **Journal Hydrology of Science**, v. 47, p. 19-30, 2002.

PARRA, V.; ARUMI, J. L.; MUNOZ, E. Identifying a Suitable Model for Low-Flow Simulation in Watersheds of South-Central Chile: A Study Based on a Sensitivity Analysis. **Journal Water**, v. 11, n. 6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11071506>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1506>. Acesso em: 23 maio 2024.

PEREIRA, G. S. **Aplicação do índice de padronização de precipitação (SPI) e de vazão (SSI) para análise de eventos de seca na bacia do Rio Suaçuí Grande / MG**. 2022. 144 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3444>. Acesso em: 09 set. 2024.

PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; SERNA, C. R.; THIBALT, M.; LE MOINE, N. Discrete parameterization of hydrological models: Evaluating the use of parameter sets libraries over 900 catchments. **Water Resources Research**, v. 44, n. 8, 2008.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169403002257?via%3Dihub>. Acesso em: 23 maio 2024.

PINCETL, S.; PORSE, E.; MIKA, K. B.; LITYAK, E.; MANAGO, K. F.; HOGUE, T. S.; GILLESPIE, T.; PATAKI, D. E.; GOLD, M. Adapting Urban Water Systems to Manage Scarcity in the 21st Century: The Case of Los Angeles. **Journal Environmental Management**, v. 63, n. 3, p. 293-308, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-018-1118-2>. Acesso em: 23 maio 2024.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. 1988: **Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing**. Cambridge University Press, Cambridge, England, 735 pp

PUSHPALATHA, R.; PERRIN, C.; LE MOINE, N; MATHEVET, T; ANDREASSIAN, V. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. **Journal of hydrology**, v. 411, n. 1-2, p. 66-76, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169411006846?via%3Dihub>. Acesso em: 23 maio 2024.

RAJSEKHAR, D.; SINGH, V.P.; MISHRA A.K. Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. **Journal of Hydrology**, v. 526, n. 1, p. 164-182, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169414009366?via%3Dihub>. Acesso em: 23 maio 2024.

RAPOSO, V. D. M. B.; COSTA, V. A. F.; RODRIGUES, A. F. A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. **Science of the Total Environment**, v. 898, n. 165550, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165550>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723041736?via%3Dihub>. Acesso em: 23 maio 2024.

REDAÇÃO (A). **Saneago investe mais de R\$ 72 milhões na recuperação do rio Meia Ponte**. Reportagem de 09.11.2017. Disponível em: <https://www.aredacao.com.br/noticias/94719/saneago-investe-mais-de-r-2-milhoes-na-recuperacao-do-rio-meia-ponte>. Acesso em: 23 mar. 2024.

REIS, T. C. S., **Extensões da Distribuição Weibull aplicadas na análise de séries climatológicas**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/a786c9ec-7596-4ee7-b9e7-10fe2fb5a397/content>. Acesso em: 23 julho 2022.

REVISTA SUPERINTERESSANTE. **Os 10 maiores períodos de seca no Brasil**. Publicado em 10 de agosto de 2014, atualizado em 21 de dezembro de 2016. Disponível em: <https://super.abril.com.br/coluna/superlistas/os-10-maiores-periodos-de-seca-no-brasil>. Acesso em: 25.03.2024.

RIBEIRO, F. da S.; OLIVEIRA, M. de F.; VILA VERDE, G. A Cidade e o Rio: entre a preservação e o descaso com o Meia Ponte em Goiânia (1933 – 2020). *In: Faces da História*, v. 8, n. 1, p. 70–92, 2021. Disponível em: <https://seer.assis.unesp.br/index.php/facesdahistoria/article/view/1975>. Acesso em: 23 maio. 2024.

ROCHA, M. C.; VEIGA, A. M. Diagnóstico das vazões do Rio Meia Ponte na estação fluviométrica jusante Goiânia. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., Curitiba, 2003. **Anais** [...]. Curitiba: SBRH, 2003. v. 2

RODRIGUES, C.; GUIMARÃES, R. C. E MOREIRA, M. **Apontamentos para as aulas de Hidrologia** –Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora. 2011. <http://hdl.handle.net/10174/4721>

SANKARASUBRAMANIAM, A.; VOGEL, R. M.; LIMBURNER, J. F. Climate elasticity of streamflow in the United States. **Water Resources Research**, v. 37, ed. 6, p. 1771–1781, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR900330>.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2007. 33 p. (Documentos 190).

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v2i3.232624>.

SANTOS, P. T.; MARTINS, A. P. Análise socioeconômica e espacial da bacia hidrográfica do Rio Meia Ponte (GO). **Revista Geografias**, v. 18, n. 2, p. 1-20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.35699/2237-549X.2022.37885>.

SAVARY, S.; ROUSSEAU, A. N.; QUILBÉ, R. Assessing the effects of historical land cover changes on runoff and low flows using remote sensing and hydrological modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 6, p. 575-587, 2009.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological processes**, v. 21, ed. 15, p. 2075-2080, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6825>.

SEIBERT, J.; VIS, M. J. P. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3315–3325, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>.

SEILER, R.A.; HAYES, M.; BRESSAN, L. Using the Standardized Precipitation Index for flood risk monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 11, p. 1365-1376, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.799>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Brasil). **Atlas Pluviométrico do Brasil**. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publicue/Hidrologia/Estudos-Hidrologicos-e-Hidrogeologicos/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-6604.html>. Acesso em: 3 jun. 2024.

SHRESTHA, B.; COCHRANE, T. A.; CARUSO, B. S.; ARIAS, M. E.; PIMAN, T. Uncertainty in flow and sediment projections due to future climate scenarios for the 3S Rivers in the Mekong Basin. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 1088–1104, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169416304498>. Acesso em: 23 maio 2024.

SINGH, S. K.; MARCY, N. Comparison of simple and complex hydrological models for predicting catchment discharge under climate change. **AIMS Geosciences** 3 (3): 467–497. 2017.

SIQUEIRA, B.; NERY, J. T. Aplicação e análise do índice padronizado de precipitação no Circuito das Águas Paulista. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13806>. Acesso em: 13 julho 2023.

SVOBODA, M.; FUCHS, B. **Handbook of Drought Indicators and Indices**. Geneva: WMO, 2016. Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327207485_Handbook_of_drought_indicators_and_indices. Acesso em: 27 maio 2024.

TAVARES, F. R.; RIBEIRO, F. S.; CASTRO, J. D. B.; SILVA, A. A. Valoração do Rio Meia Ponte no trecho urbano do Parque Atheneu em Goiânia: uma aplicação do método do custo de reposição. **Revista Mirante**, Anápolis (GO), v. 16, n. 1, p. 147-164, jun. 2023. ISSN 1981-4089. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/13860>. Acesso em: 23 maio 2024.

TELESCA, L.; LOVALLO, M.; LOPEZ-MORENOC, I.; VICENTESERRANO, S. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 391, n. 4-5, p. 1662 – 1678, fev. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.10.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378437111008211>. Acesso em: 23 maio 2024.

TERASSI, P. M. D. B.; OLIVEIRA, J. F. de; GOIS, G. de; GALVANI, E.; SOBRAL, B. S.; BIFFI, V. H. R. Standardized Precipitation Index Aplicado à Identificação do Padrão das Chuvas na Vertente Paranaense da Bacia Hidrográfica do Rio Itararé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, p. 557-571, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786344069>.

THOM, H. C. S. Some methods of climatological analysis. Geneva: **World Meteorological Organization**, 1966. 53 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, UFRGS, ABRH, 1998.

VANELLI, F. M., FAN, F. M., KOBAYAMA, M. Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17 e 24, 2020. <https://doi.org/10.21168/rega>.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; ANGULO, M.; EL KENAWY, A. A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901–2006) of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based on the Palmer Drought Severity Index. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 4, p. 1033–1043, ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. **Journal of Climate** 23: 1696, 2010. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E. Accurate computation of a streamflow drought index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 2, 318-332, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.00004](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.00004).

VIDMAR, A.; BRILLY, M.; SAPAC, K.; KRYZANOWSKI, A. Efficient Calibration of a Conceptual Hydrological Model Based on the Enhanced Gauss-Levenberg-Marquardt Procedure. **Journal Applied Sciences-Basel**, v. 10, n. 11, p. 3841, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113841>.

VILLELA, S. M., MATTOS, A., 1975. **Hidrologia aplicada**. McGraw-Hill, São Paulo. 245 p.

WAGENER, T.; MCINTYRE, N. Tools for teaching hydrological and environmental modeling. **Computers in Education Journal**, v. 17, n. 3, p. 16-26, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237432431> Tools for teaching hydrological and environmental modeling. Acesso em: 23 maio 2024.

WAGENER, T; BOYLE, D. P.; LEES, M. J.; WHEATER, H.S.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. A framework for development and application of hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 13-26, 2001. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>.

WALD, A. e WOLFOWITZ, J. **An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation**. Annals of Mathematical Statistics, 14, pp. 378-388, 1943

WILHITE, D. A.; PULWARTY, R. S. **Drought and Water Crises**. 2. ed.. Boca Raton : CRC Press, 2018. CRC Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/b22009>.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO**. Guide to Hydrological Practices, Volume II. [S.l.: s.n.], 2009. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO**. **Standardized Precipitation Index User Guide**. 2012. WMO-No. 1090. Chair, Publications Board. Switzerland. ISBN 978-92-63-11091-6.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: GLOBAL WATER PARTNERSHIP. **Handbook of Drought Indicators and Indices**. Geneva: WMO, 2016. ISBN 9789187823244. (Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2).

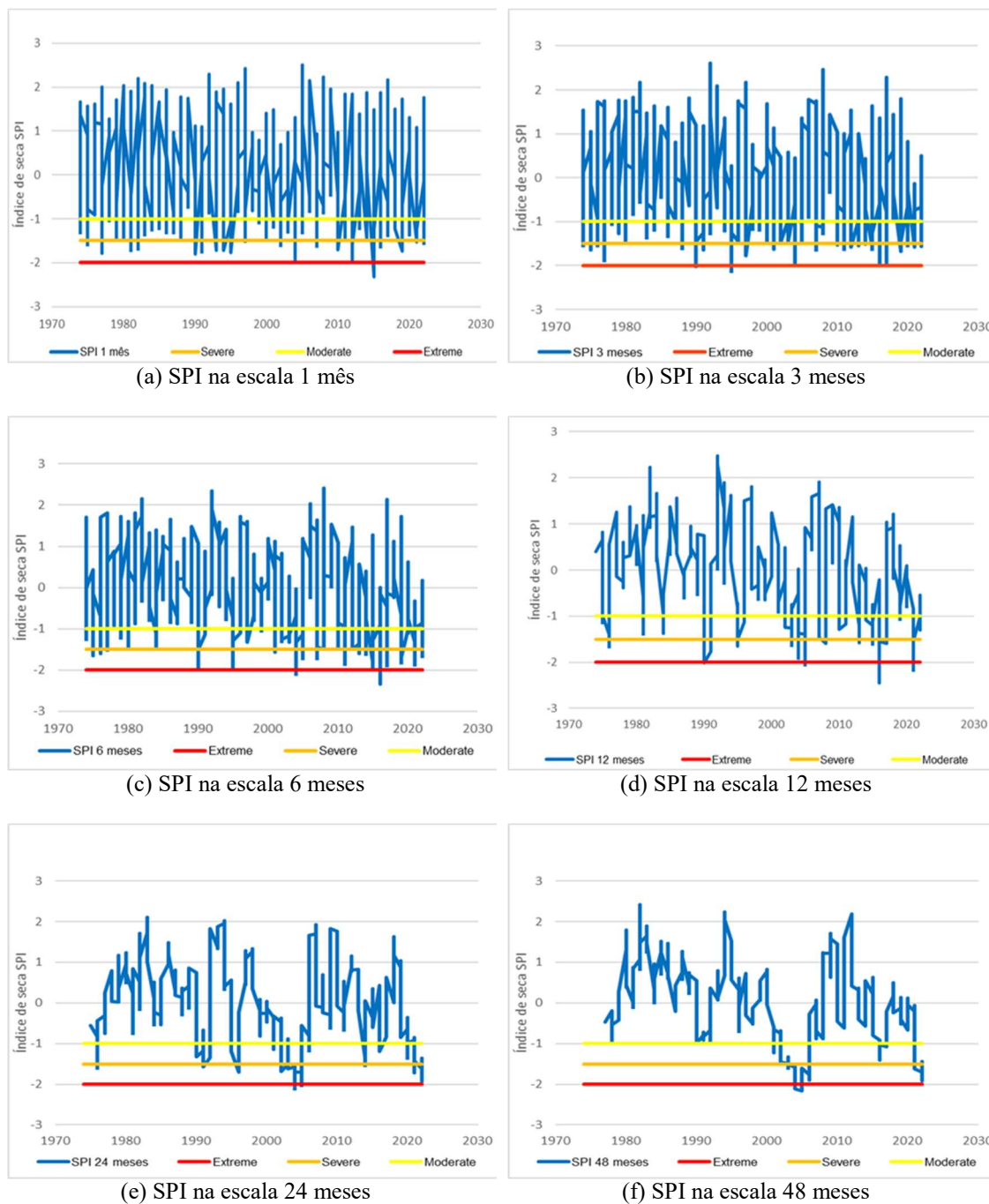
YIHDEGO, Y.; VAHEDDOOST, B.; AL-WESHA, R. A. Drought indices and indicators revisited. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, p. 69, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z>.

ZENG, N.; YOON, J. H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, p. 1-9, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002>.

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS PARA AVALIAÇÃO DAS SECAS

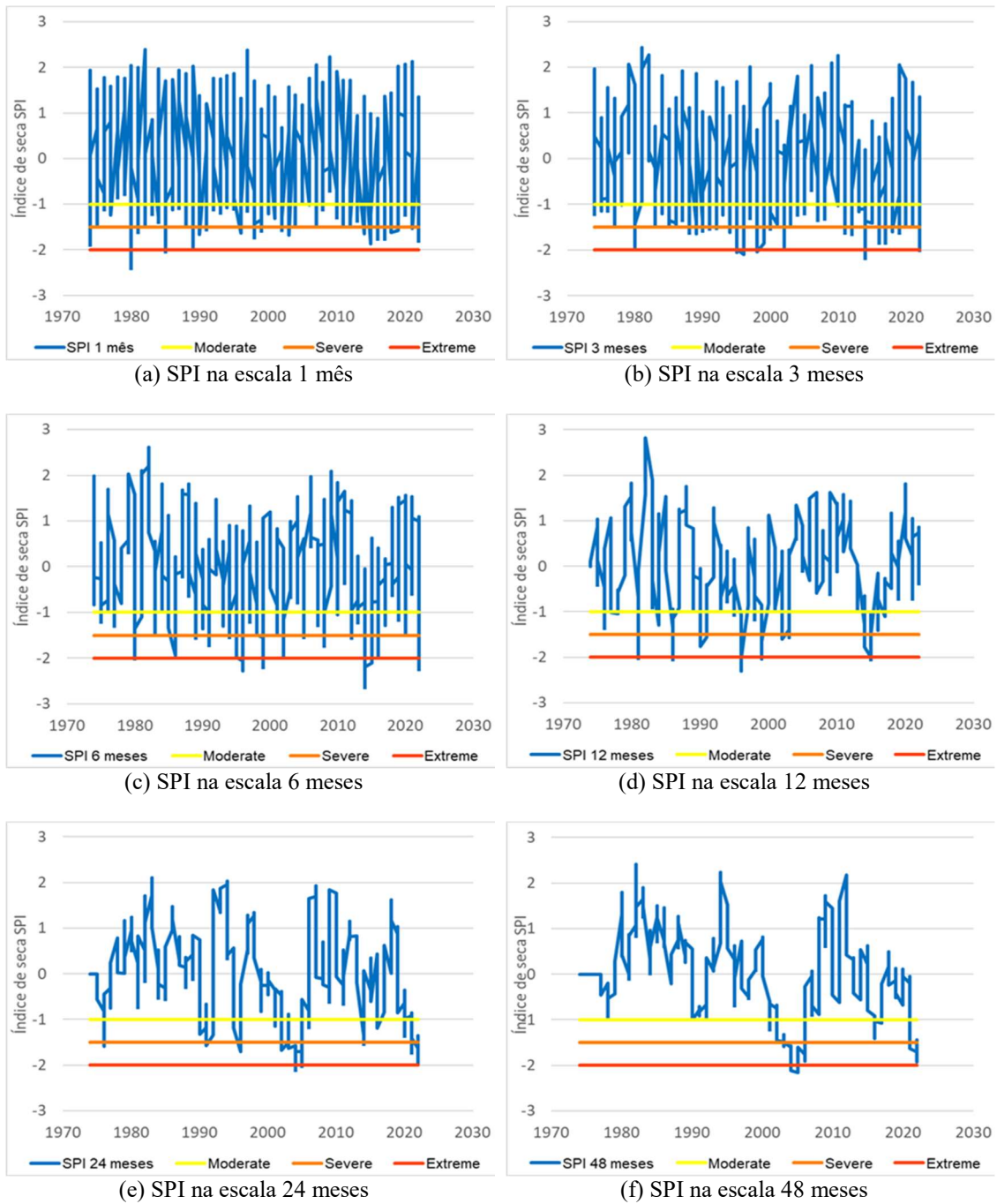
Com os resultados dos índices SPI e SSI foram gerados gráficos para as estações selecionadas para este estudo (Quadros 4 e 5), nas escalas de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, apresentados nas Figuras A1 a A17.

Figura A1 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Aragoiânia (1974-2022)



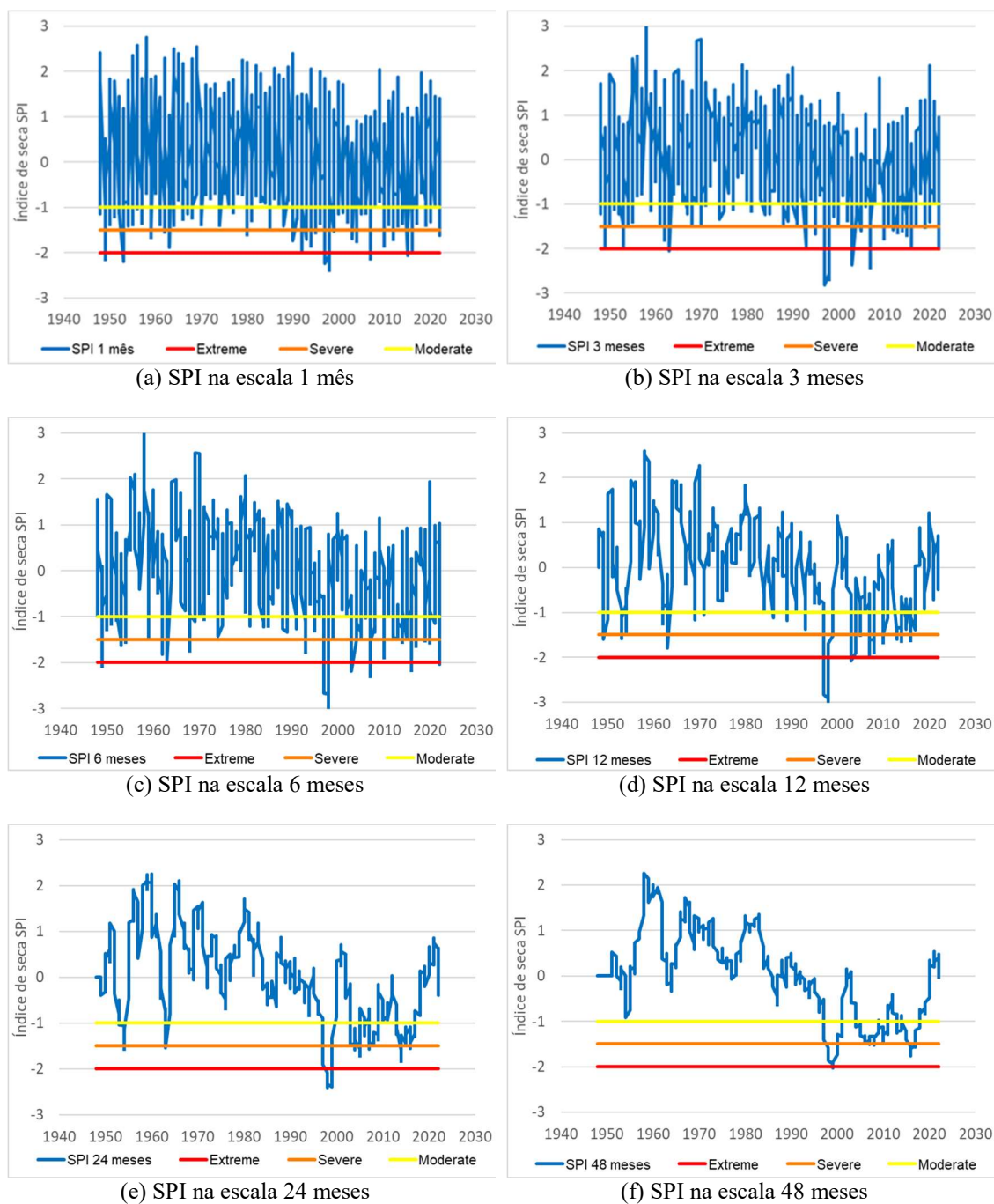
Fonte: a autora

Figura A2 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Goianópolis (1974-2022)



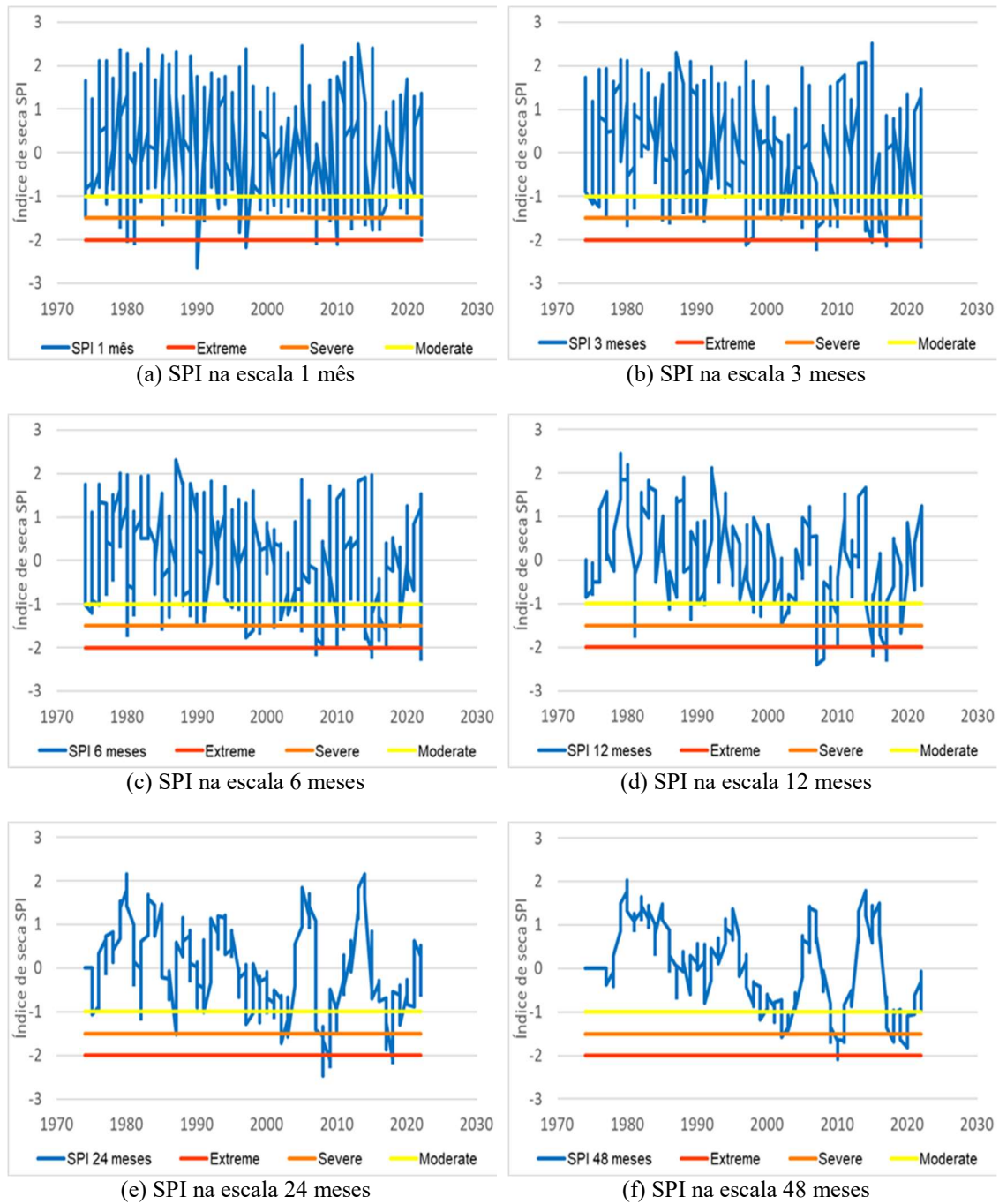
Fonte: a autora

Figura A3 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Inhumas (1974-2022)



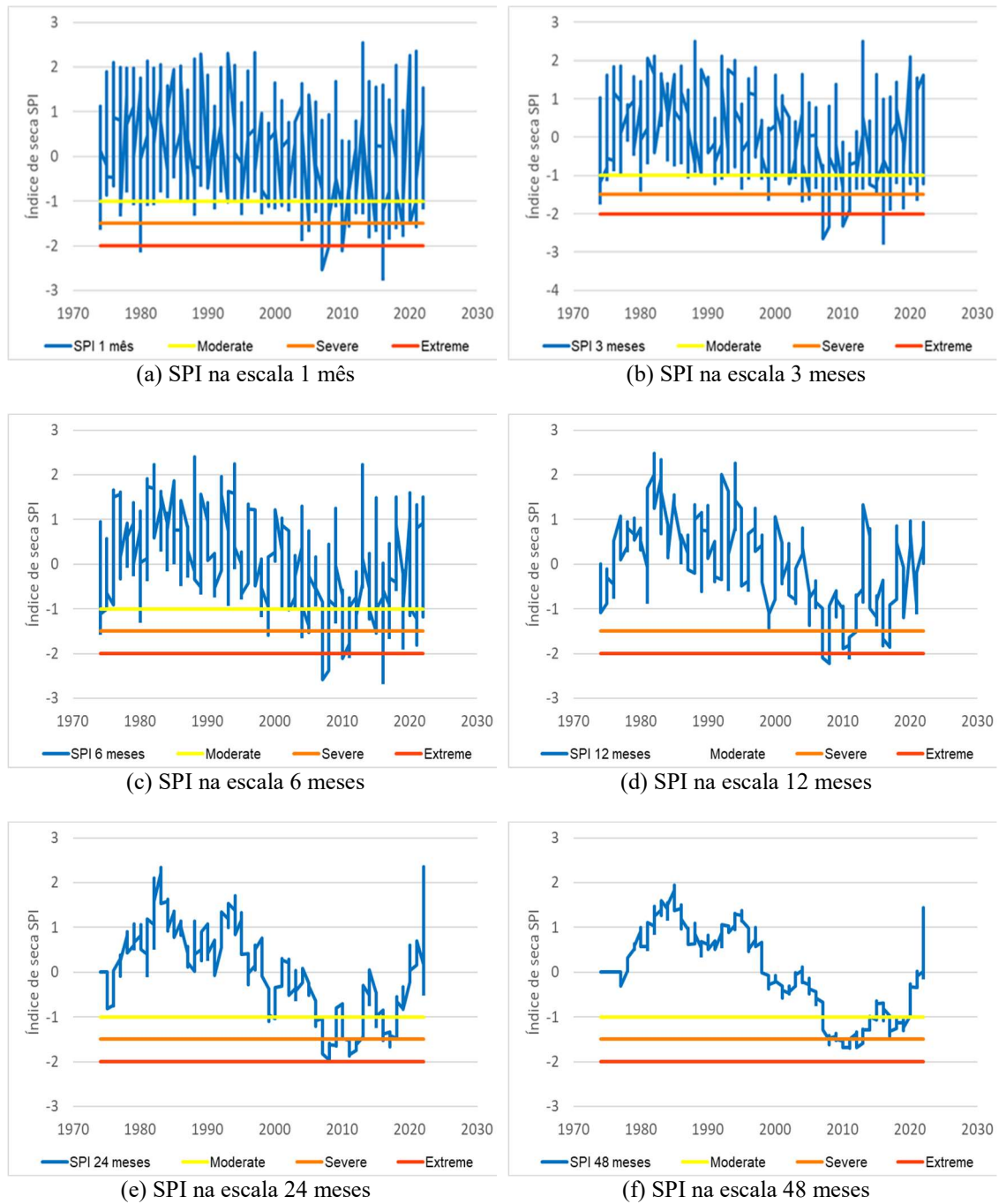
Fonte: a autora

Figura A4 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Ouro Verde (1974-2022)



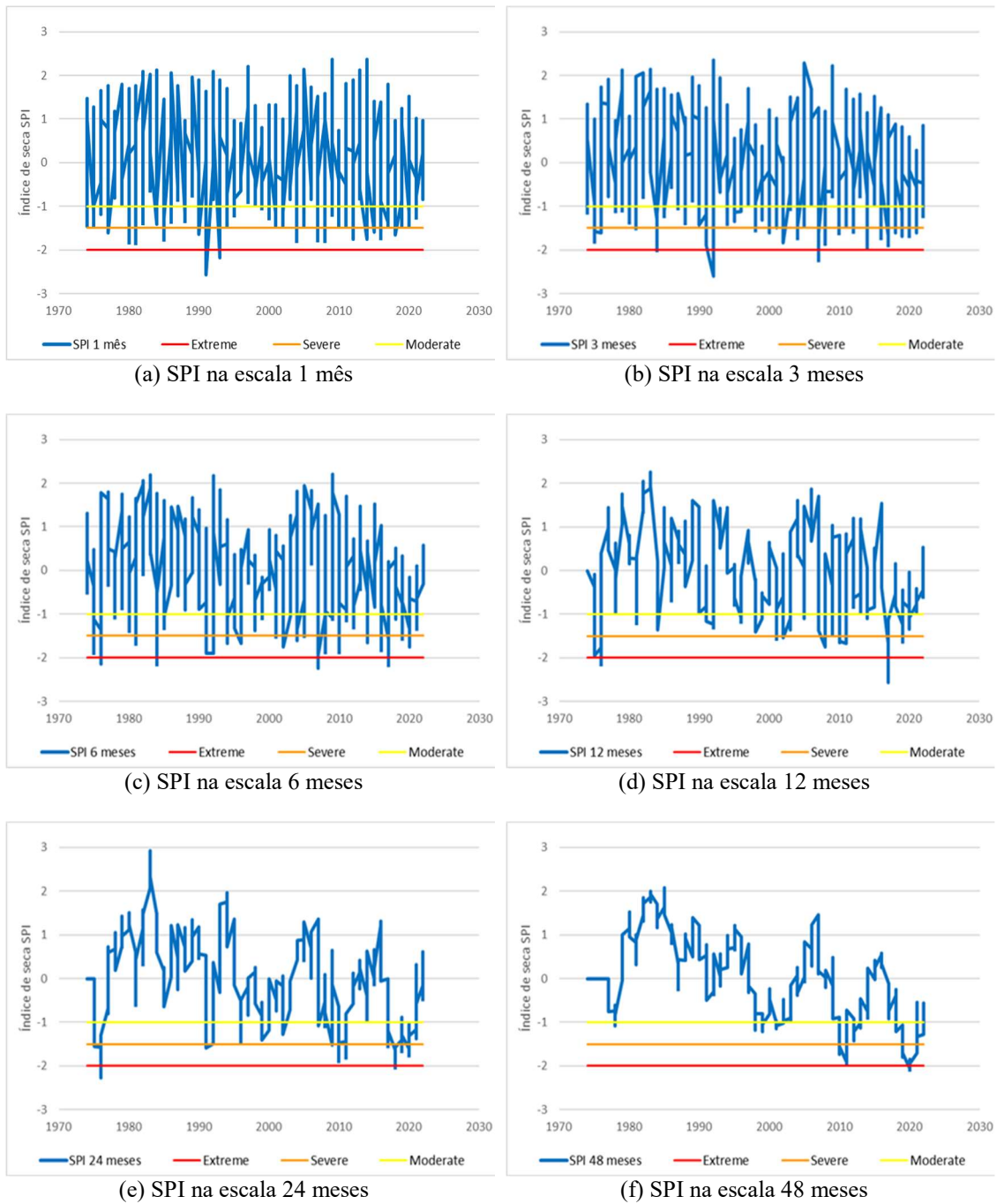
Fonte: a autora

Figura A5 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Trindade (1974-2022)



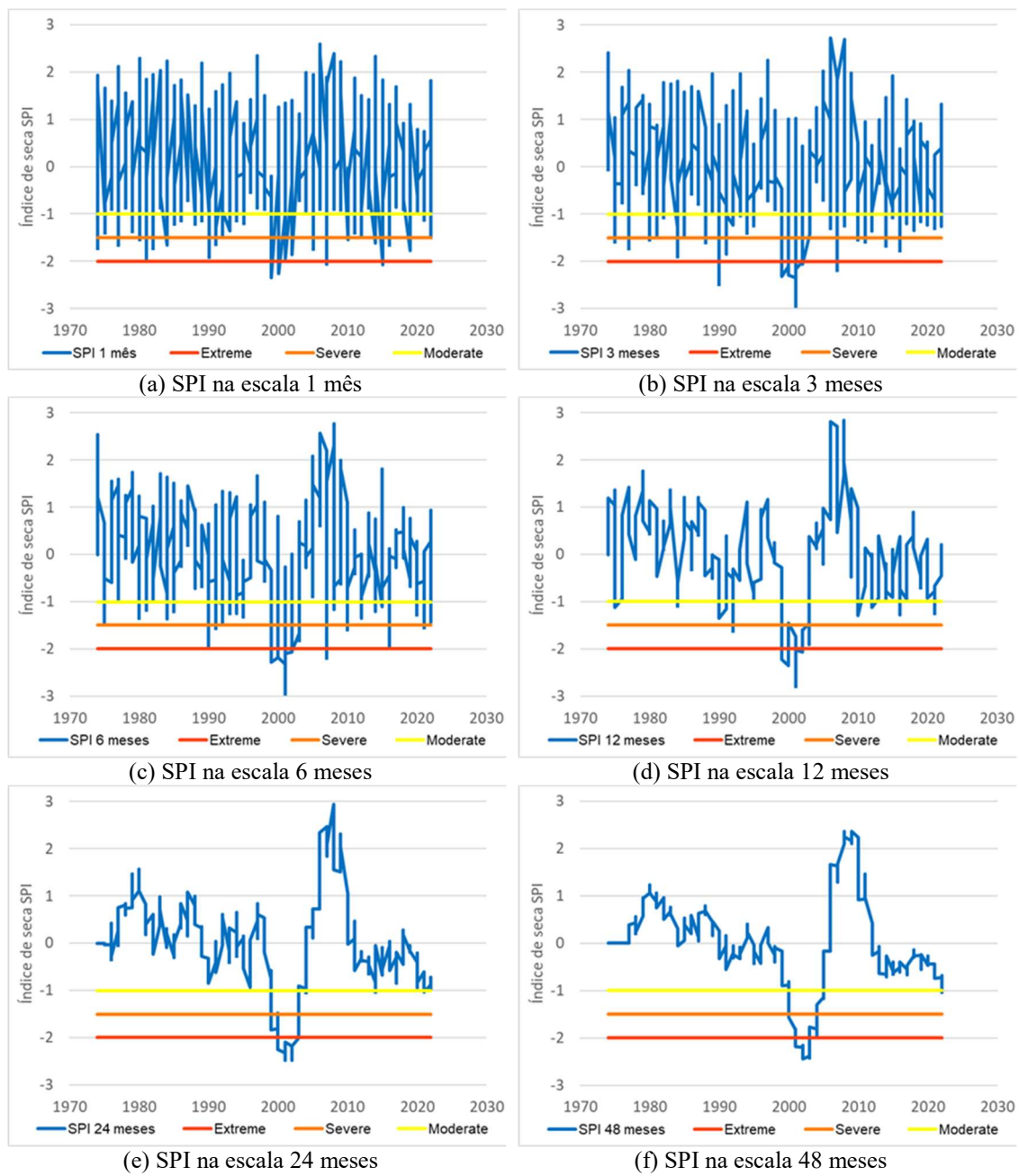
Fonte: a autora

Figura A6 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Morrinhos (1974-2022)



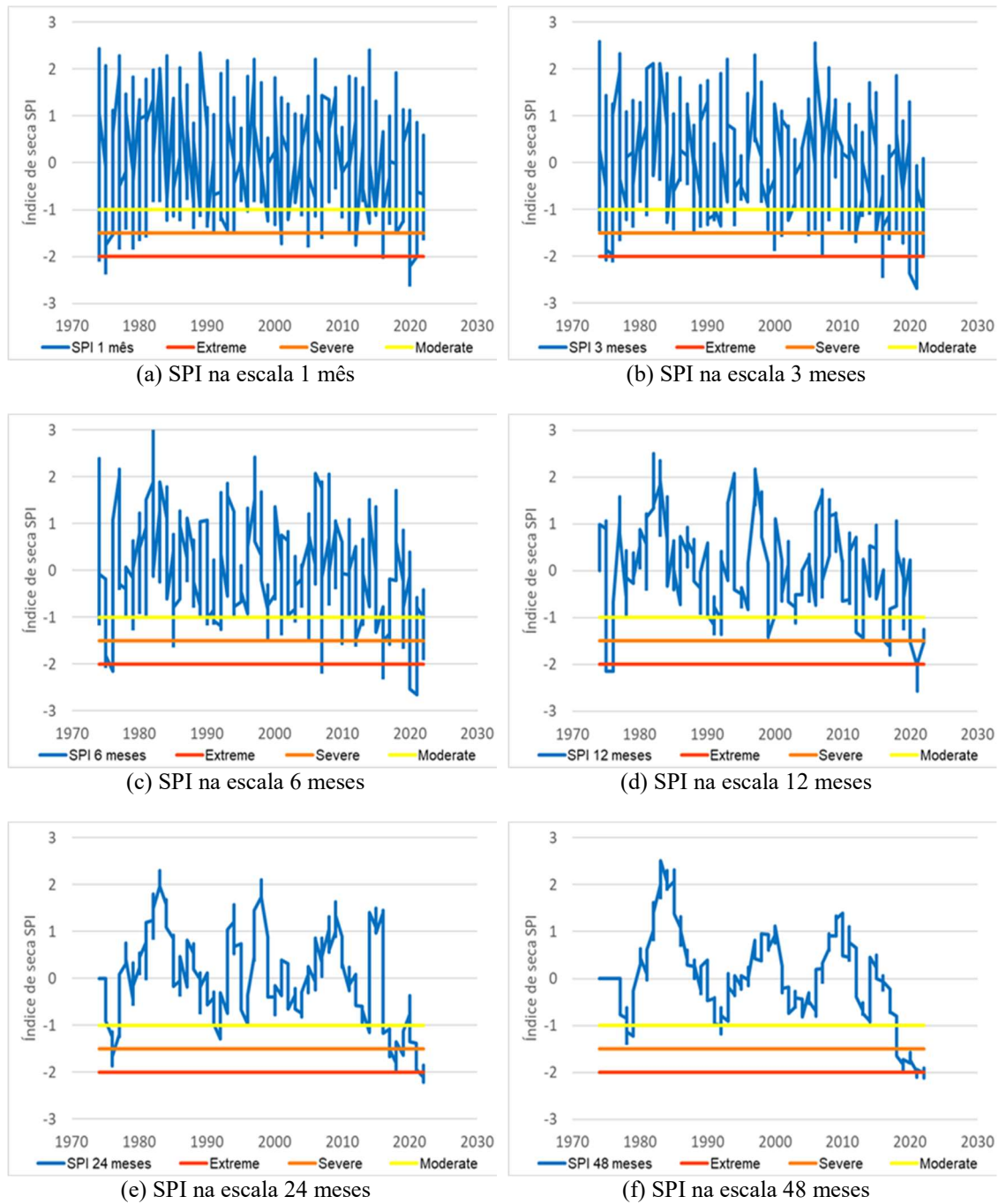
Fonte: a autora

Figura A7 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Joviânia (1974-2022)



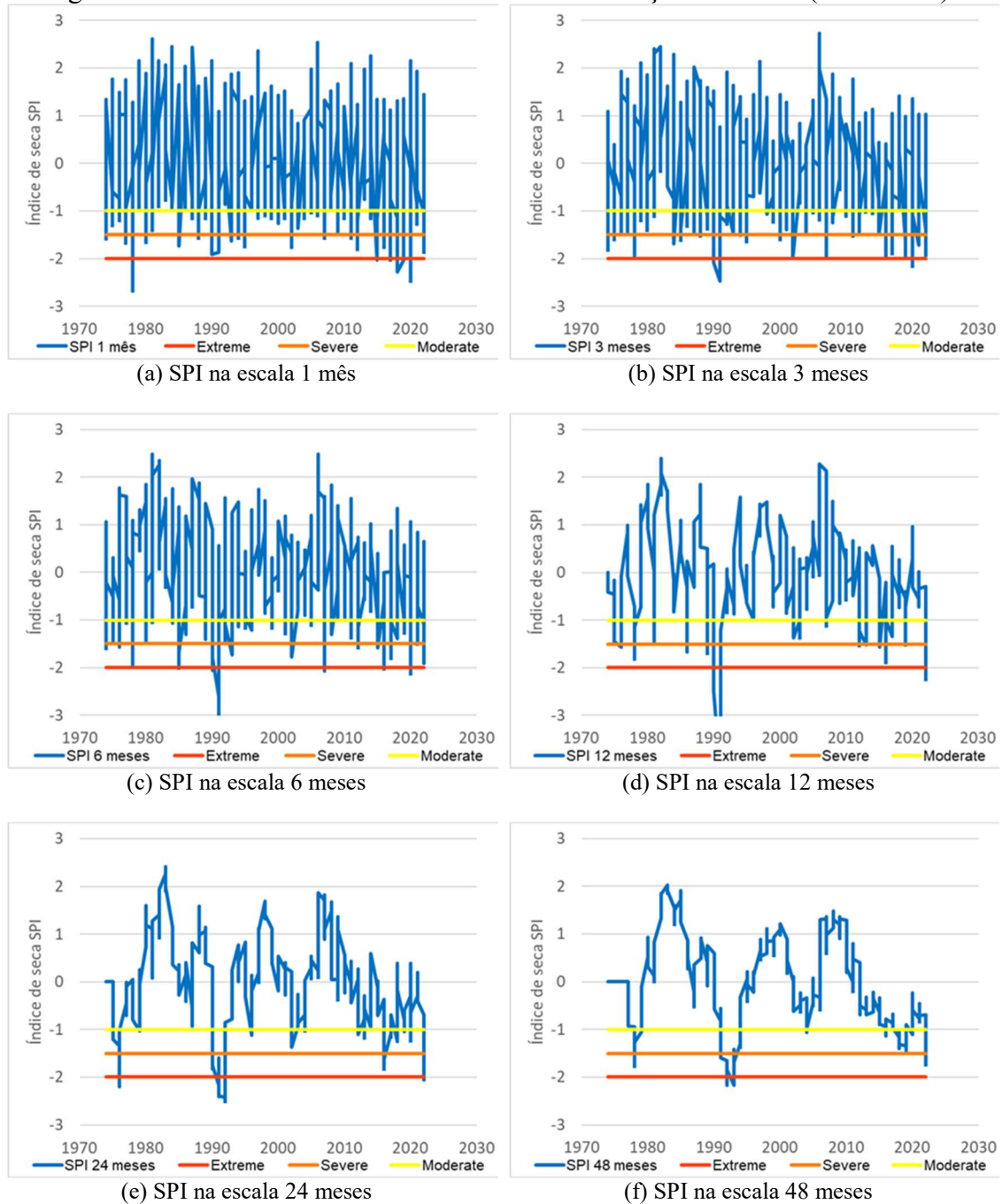
Fonte: a autora

Figura A8 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Pontalina (1974-2022)



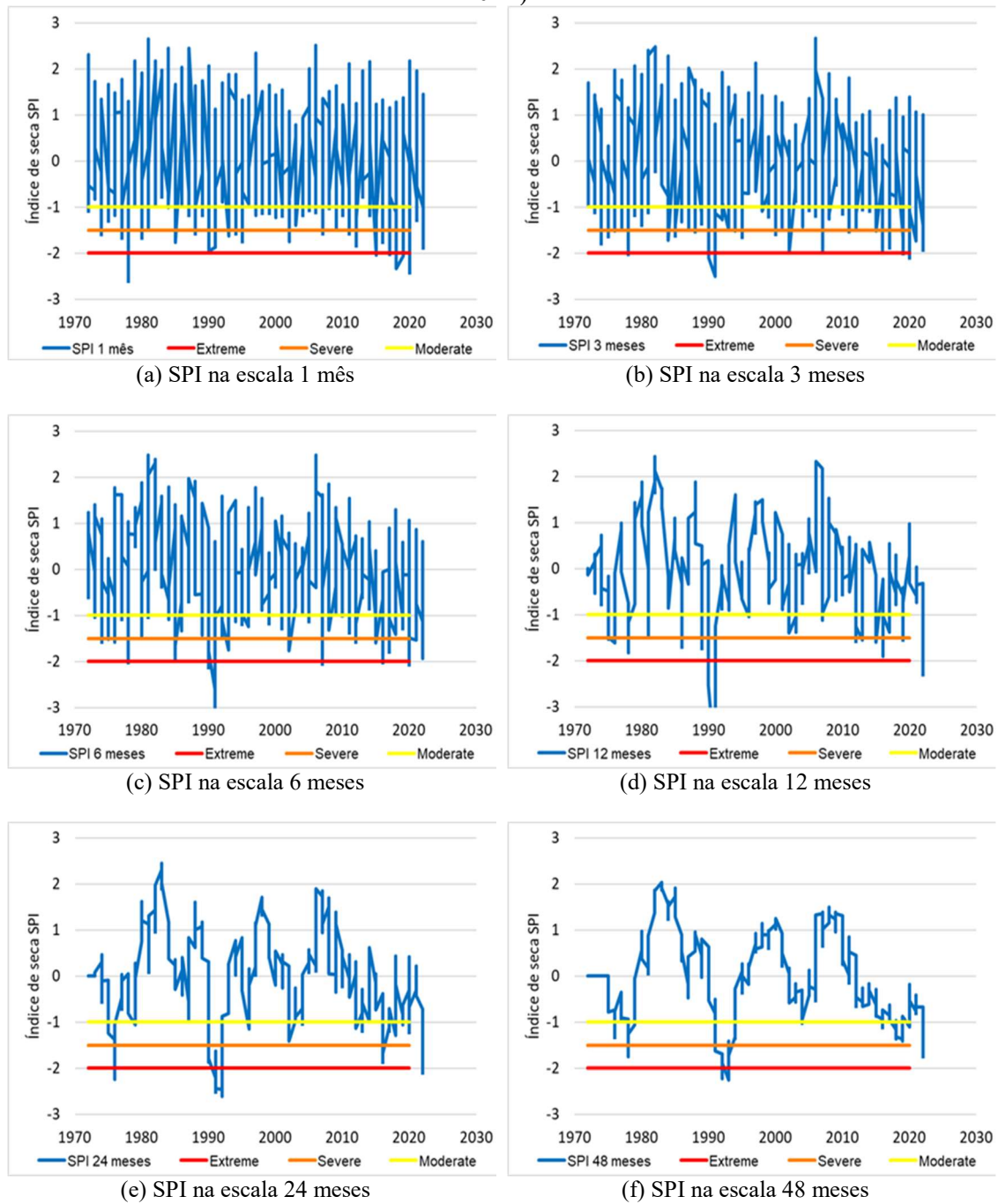
Fonte: a autora

Figura A9 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Cromínia (1974-2022)



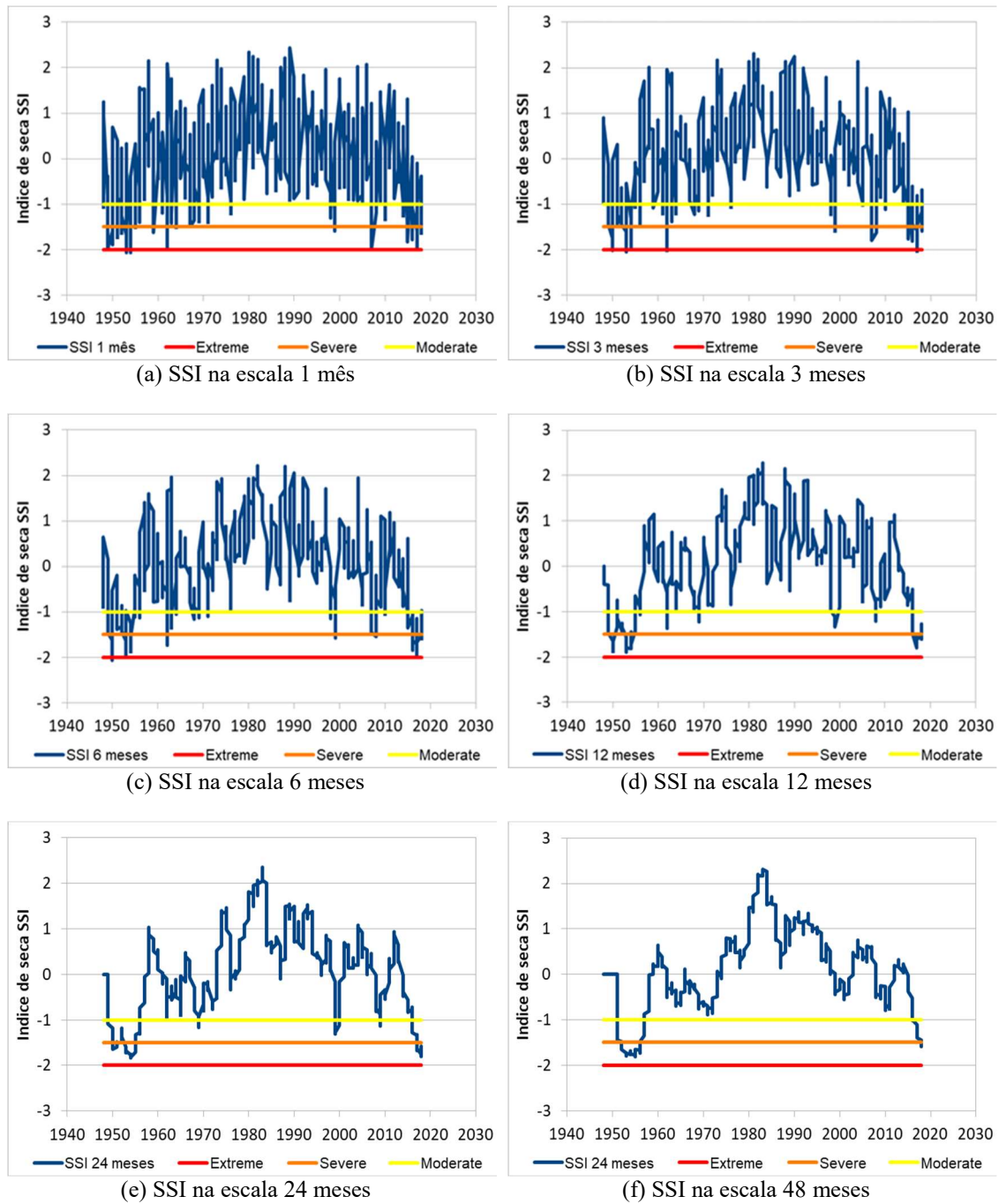
Fonte: a autora

Figura A10 - Resultados do índice de seca SPI da Estação Ponte Meia Ponte (1974-2022)



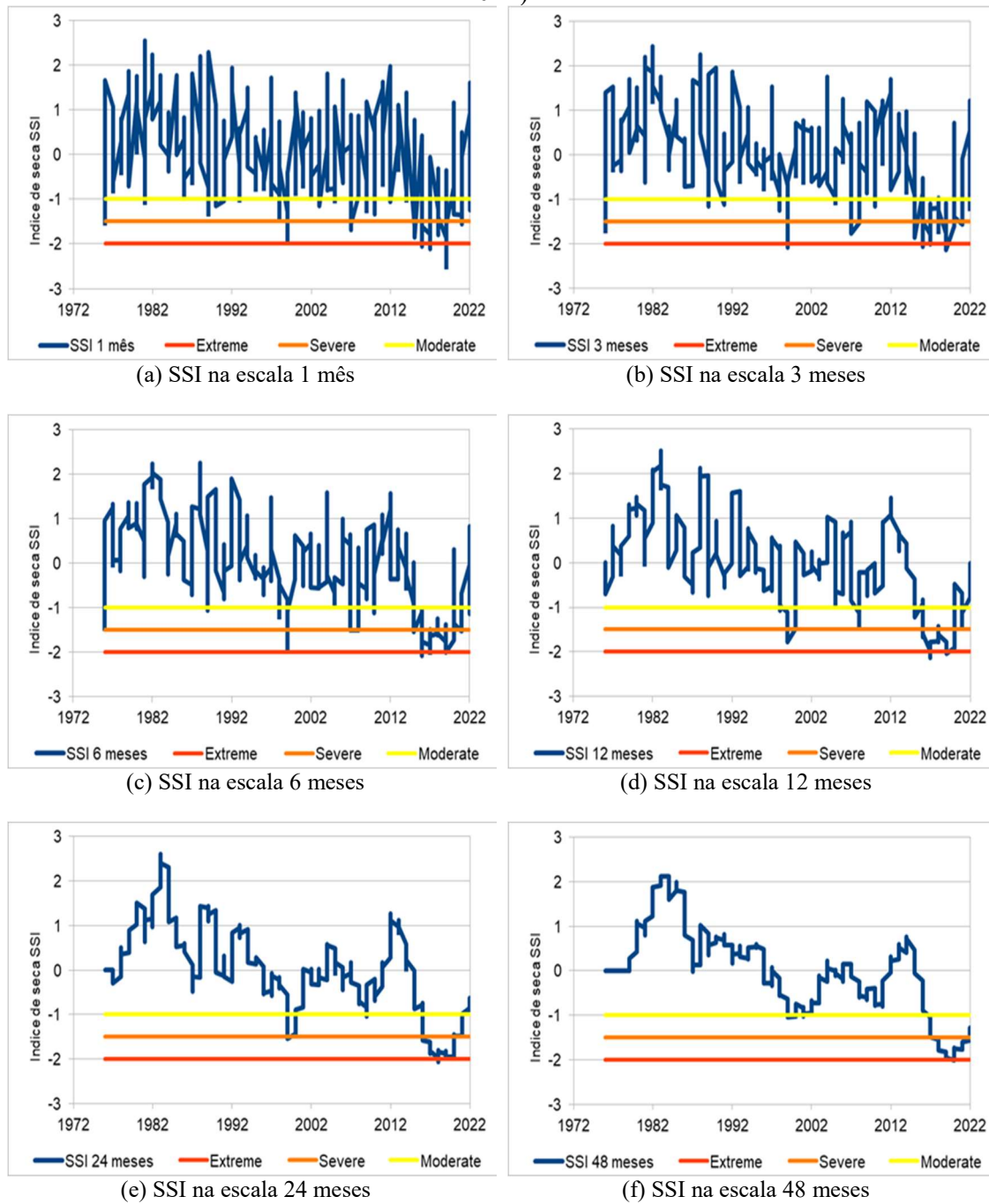
Fonte: a autora

Figura 75 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Inhumas (1948-2022)



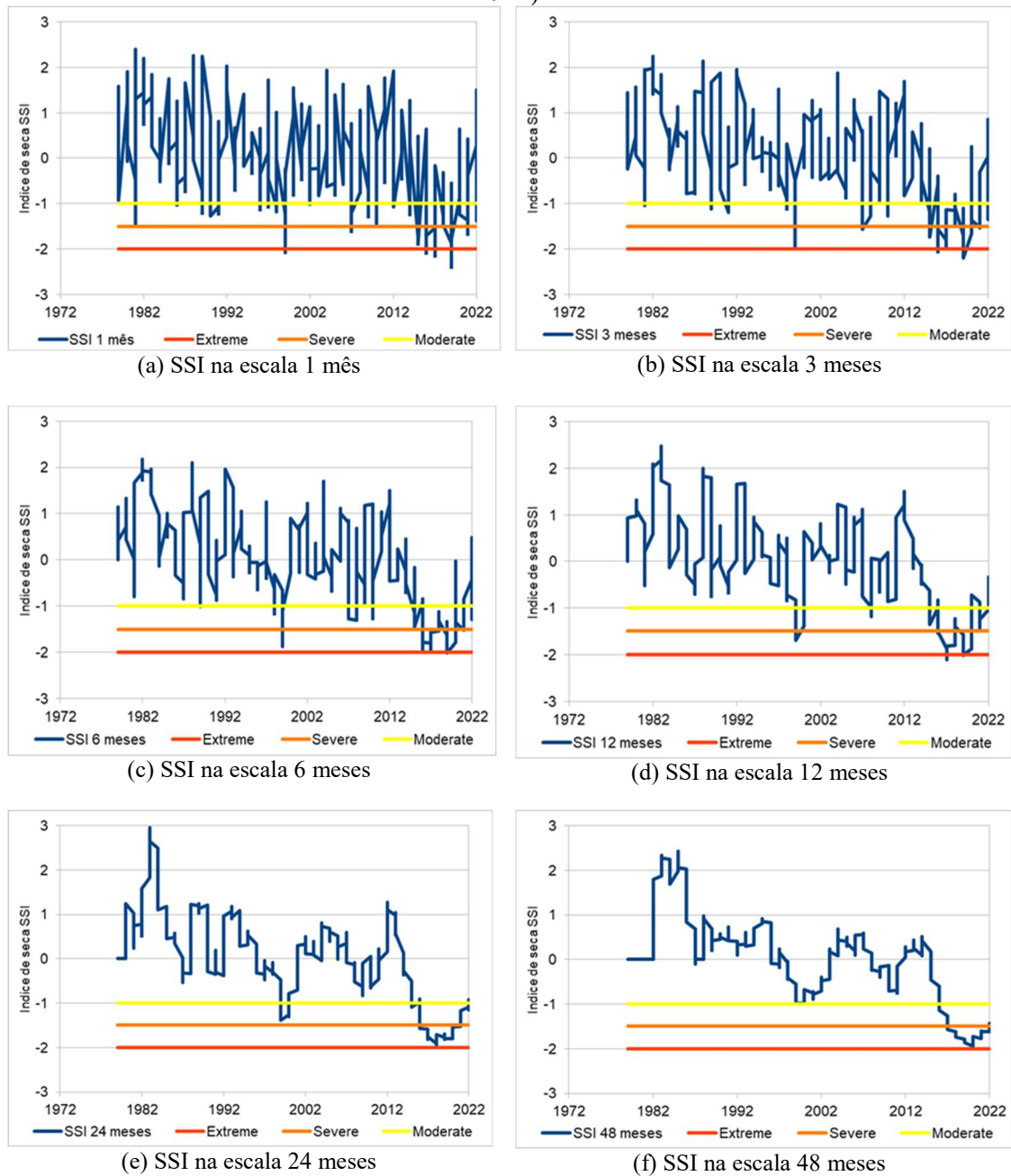
Fonte: a autora

Figura 76 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Montante de Goiânia (1974-2022)



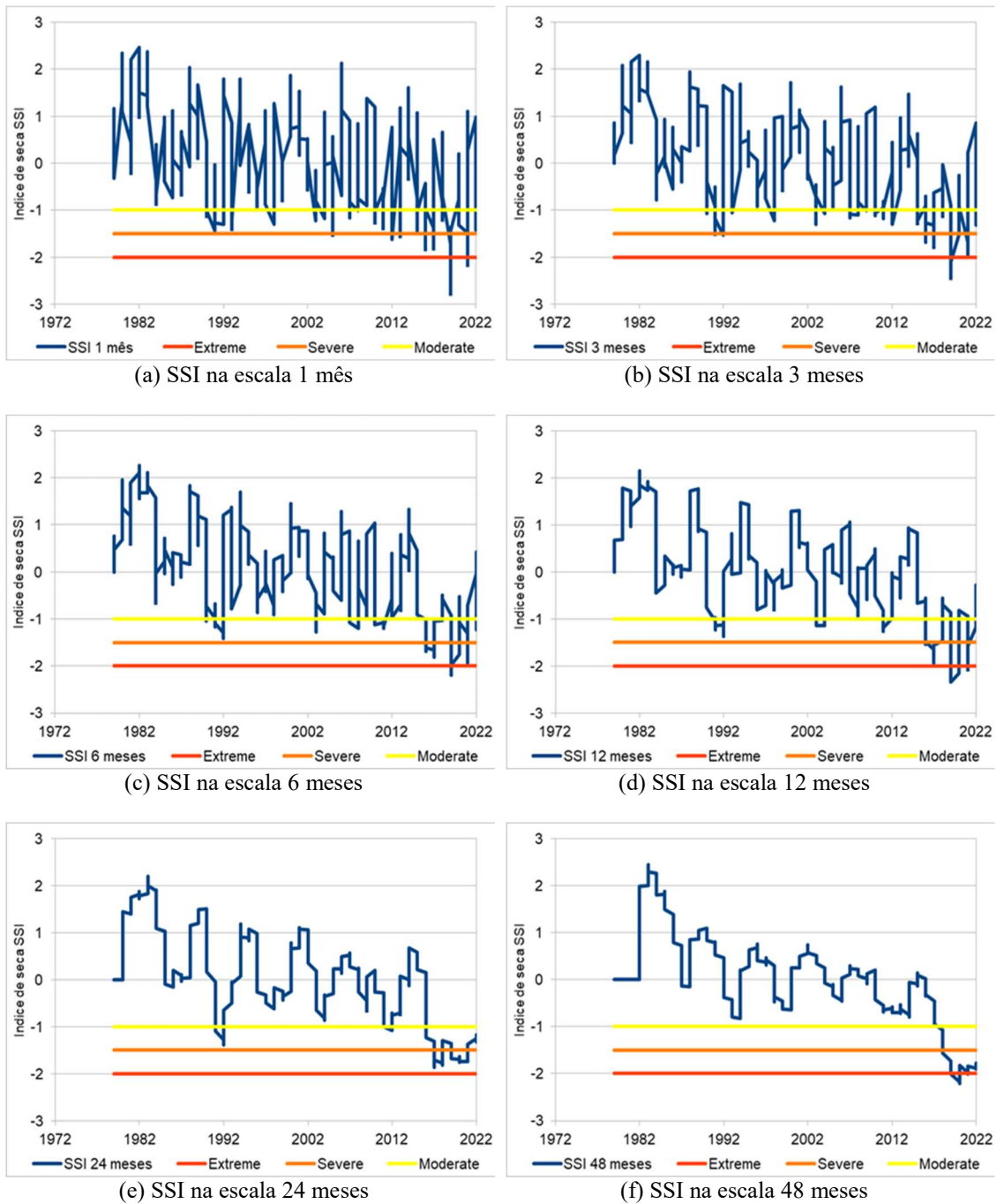
Fonte: a autora

Figura 77 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Jusante de Goiânia (1974-2022)



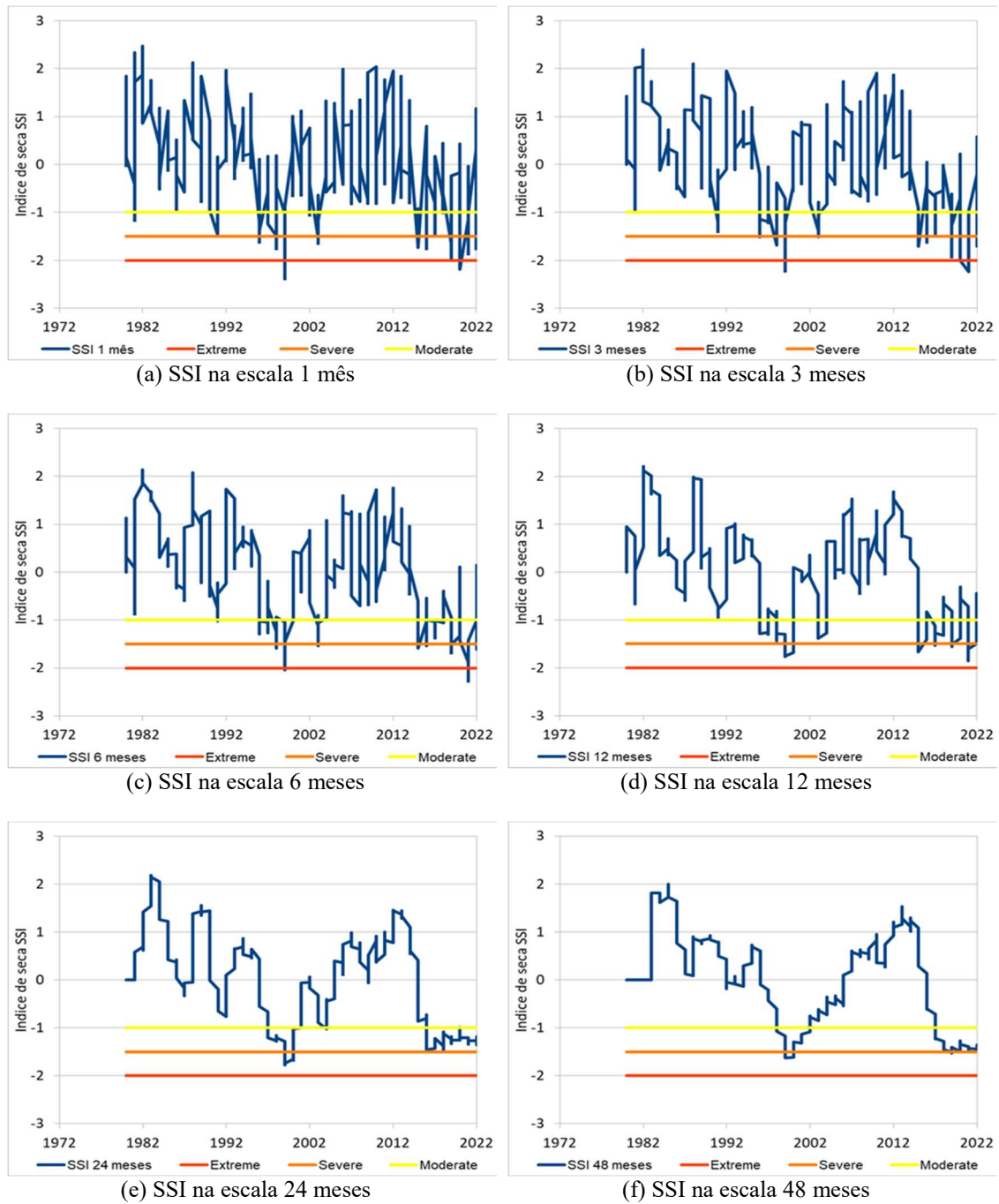
Fonte: a autora

Figura A14 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ribeirão das Caldas (1974-2022)



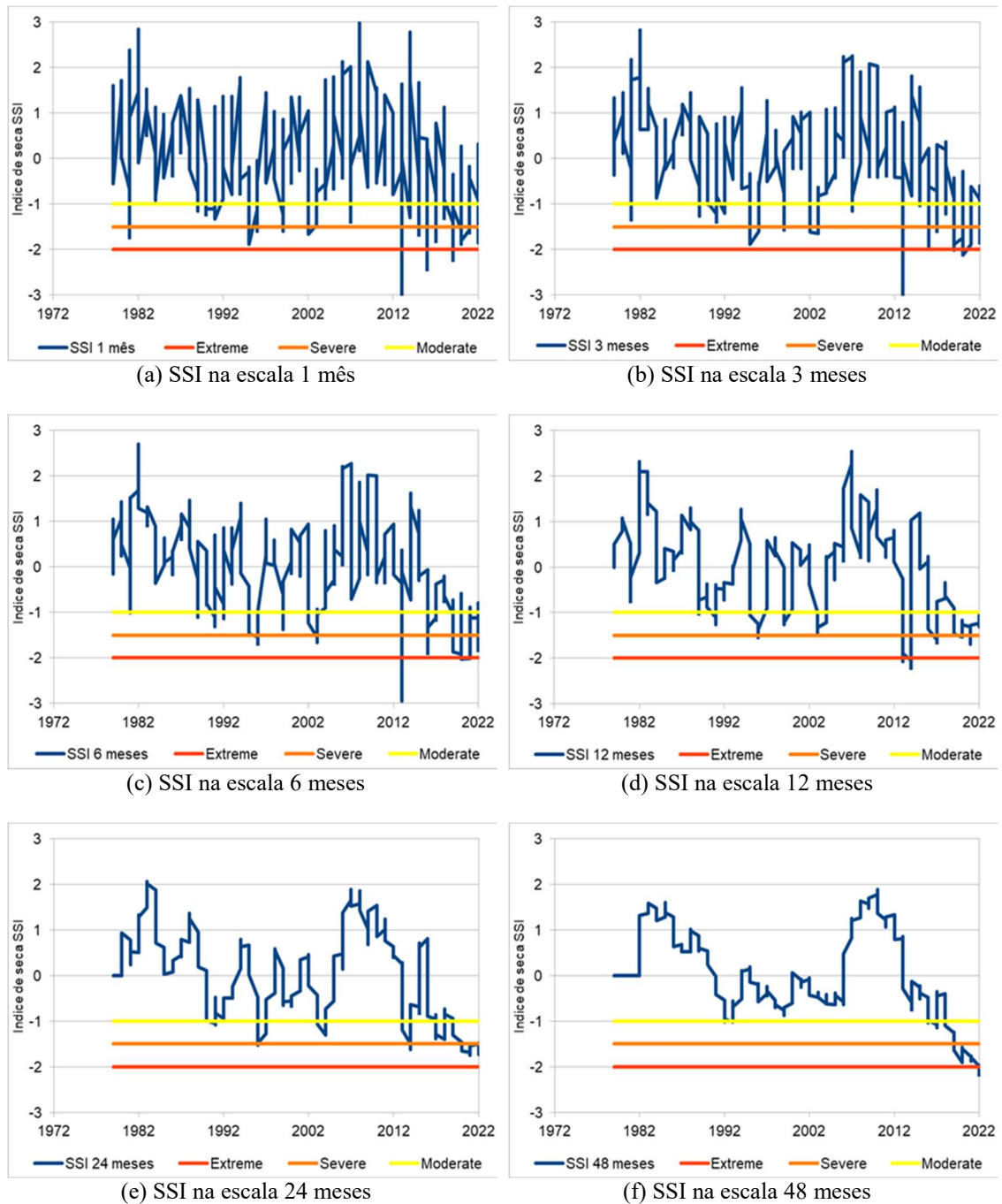
Fonte: a autora

Figura A15 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Fazenda Sucuri (1974-2022)



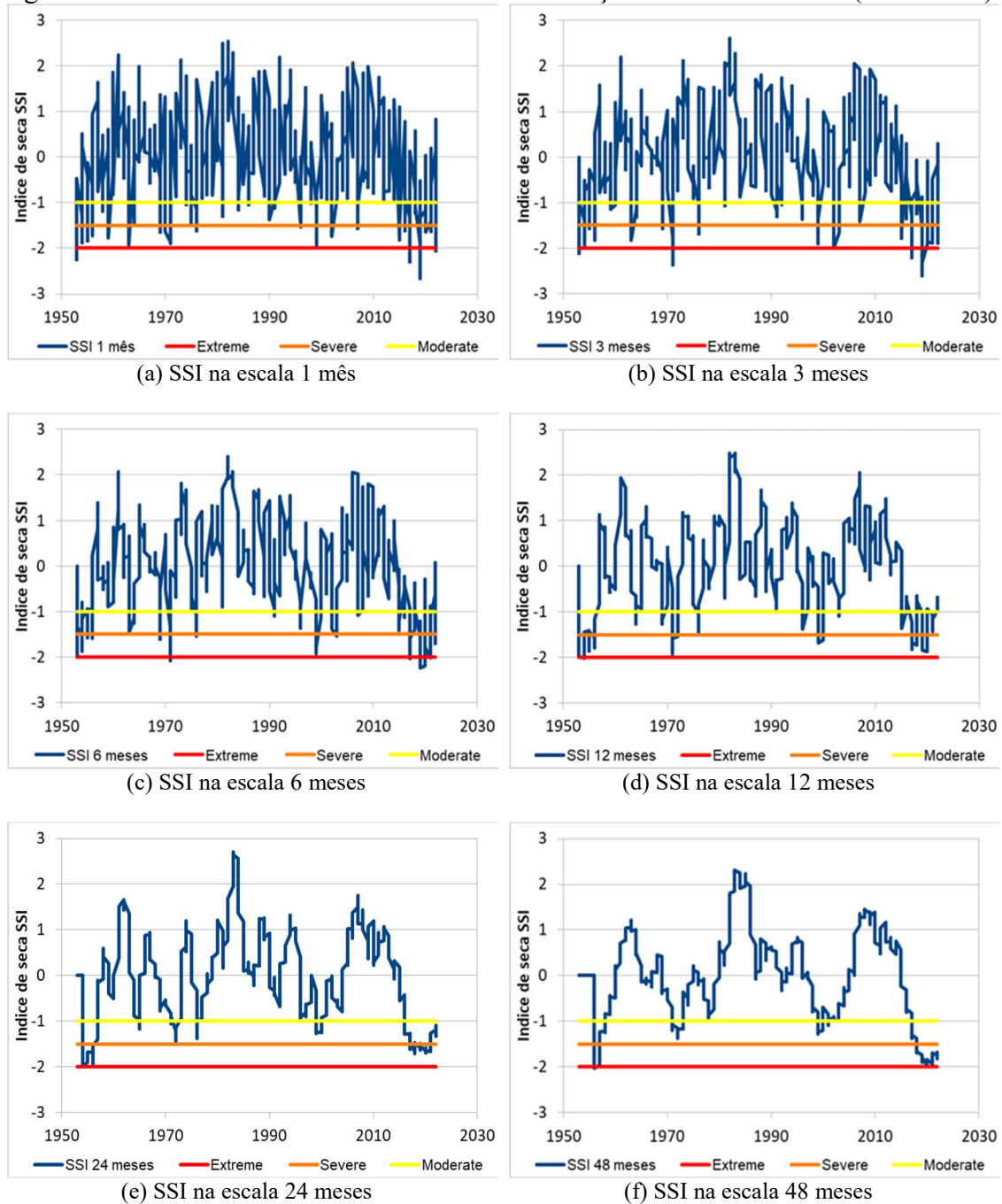
Fonte: a autora

Figura A16 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Professor Jamil (1974-2022)



Fonte: a autora

Figura 78 - Resultados do índice de seca SSI da Estação Ponte Meia Ponte (1974-2022)



Fonte: a autora