



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ALESSANDRA LUIZA SILVA CUNHA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DAS SUB-BACIAS DO ALTO RIO UBERABINHA
E DO RIBEIRÃO BOM JARDIM A MONTANTE DAS CAPTAÇÕES PARA
ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Uberlândia, 2025

ALESSANDRA LUIZA SILVA CUNHA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DAS SUB-BACIAS DO ALTO RIO UBERABINHA
E DO RIBEIRÃO BOM JARDIM A MONTANTE DAS CAPTAÇÕES PARA
ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eugénio Pereira

Uberlândia, 2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972	Cunha, Alessandra Luiza Silva, 1994-
2025	MODELAGEM HIDROLÓGICA DAS SUB-BACIAS DO ALTO RIO UBERABINHA E DO RIBEIRÃO BOM JARDIM A MONTANTE DAS CAPTAÇÕES PARA ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA [recurso eletrônico] : - / Alessandra Luiza Silva Cunha. - 2025.
<p>Orientador: Carlos Eugénio Pereira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.311 Inclui bibliografia.</p>	
<p>1. Engenharia civil. I. Pereira, Carlos Eugénio,1974-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.</p>	
CDU: 624	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902
Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgce - posgradcivil@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 318, PPGEC				
Data:	30 de maio de 2025	Hora de início:	9h 00 minutos	Hora de encerramento:	11h 00 minutos
Matrícula do Discente:	12312ECV001				
Nome do Discente:	Alessandra Luiza Silva Cunha				
Título do Trabalho:	Modelagem hidrológica das sub-bacias do Alto Rio Uberabinha e do Ribeirão Bom Jardim a montante das captações para análise de disponibilidade hídrica				
Área de concentração:	Análise Espacial, Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Modelagem hidrológica das sub-bacias do Alto Rio Uberabinha e do Ribeirão Bom Jardim a montante das captações para análise de disponibilidade hídrica				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pela Professora Doutora Maria Clara Fava - UFSCar, Pesquisador Dr. Javier Tomasella - INPE e Professor Dr. Carlos Eugenio Pereira, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Carlos Eugenio Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eugênio Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/06/2025, às 23:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Fava, Usuário Externo**, em 04/06/2025, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Javier Tomasella, Usuário Externo**, em 06/06/2025, às 07:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6332544** e o código CRC **90B8B36F**.

Referência: Processo nº 23117.031520/2025-19

SEI nº 6332544

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar e de forma muito especial, a Deus, que esteve comigo nos melhores e piores momentos da minha vida, me carregando no colo quando precisei. A Ele, por ter colocado em meu coração o sonho de fazer o mestrado e por me capacitar a chegar até aqui.

À Nossa Senhora Aparecida, minha fiel companheira nos momentos de oração, agradeço por tantas vezes em que pedi por sua intercessão durante minha trajetória no mestrado e me senti ouvida e acolhida.

Agradeço ao meu marido, Pedro, que me incentiva a ser uma pessoa melhor todos os dias, que acredita em mim mais do que eu mesma e que durante esse caminho desafiador do mestrado, nunca me deixou desanimar ou desistir.

Agradeço também aos meus pais, Eustáquio e Neide, que não mediram esforços para sempre me proporcionar o melhor e que, com seus exemplos diários de dedicação e persistência moldaram quem sou. Aos meus irmãos, Nayara e Gabriel, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim mesmo nos momentos mais desafiadores.

Minha gratidão a todos os professores e colaboradores da Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao meu orientador, Professor Carlos Eugênio, por sua paciência, atenção e orientação ao longo de todo o processo.

Agradeço também à Nancy Simmons, desenvolvedora no Texas A&M University System, por sua generosidade em compartilhar conhecimento, esclarecendo minhas dúvidas sobre o modelo SWAT+ com paciência e precisão.

Por fim, meu agradecimento ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), meu local de trabalho, que me proporcionou um universo de possibilidades no campo do saneamento.

RESUMO

Os estudos que consideram a disponibilidade hídrica de bacias têm se mostrado cada vez mais presentes em instituições de pesquisa, dada a importância de estudar a segurança hídrica e a capacidade dos recursos hídricos para atender os múltiplos usos na bacia. Nesse contexto, o objetivo desse estudo é realizar a modelagem hidrológica com o modelo SWAT+ para avaliar a disponibilidade hídrica em duas sub-bacias importantes que realizam o abastecimento de água na cidade de Uberlândia-MG. A metodologia envolveu a elaboração da base cartográfica, o levantamento do banco de dados do relevo, uso e ocupação do solo, tipos de solo, obtenção e processamento dos dados climáticos. Essas informações foram integradas ao modelo SWAT+, seguido de análises de sensibilidade, calibração, validação do modelo, elaboração de cenários e construção das curvas de permanência. Os resultados incluem, mapas dos modelos digitais de elevação, das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) e séries temporais de vazões geradas pelo modelo. A simulação abrangeu o período de 01/01/2007 a 31/12/2023. Nos resultados obtidos na primeira etapa, sem calibração, os índices de qualidade da simulação (NSE, PBIAS e R²) indicaram um desempenho não satisfatório. Entretanto, após a análise de sensibilidade, calibração e validação os índices foram ajustados para níveis satisfatórios, evidenciando a capacidade do modelo de representar o comportamento hidrológico da região. Após essa etapa, realizou-se a simulação de dois cenários para cada sub-bacia. Para avaliação da disponibilidade hídrica utilizou-se a vazão Q90, obtida por meio das curvas de permanência. Os resultados demonstram uma importante questão de gestão de recursos hídricos: em períodos de escassez a demanda hídrica pode superar a disponibilidade de água nessas sub-bacias, pressionando o sistema de abastecimento público. Assim, o modelo SWAT+ demonstrou sua viabilidade e eficiência como suporte ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos, destacando-se como instrumento de planos de manejo e gestão integrada de bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Disponibilidade hídrica. Gestão de recursos hídricos. Segurança hídrica. Modelo SWAT+.

ABSTRACT

Studies that consider water availability in watersheds have become increasingly common in research institutions, given the importance of assessing water security and the capacity of water resources to meet multiple uses within a basin. In this context, the objective of this study is to perform hydrological modeling using the SWAT+ model to evaluate water availability in two key sub-basins responsible for supplying water to the city of Uberlândia, Minas Gerais, Brazil. The methodology involved the development of the cartographic base and the compilation of a database including topography, land use and land cover, soil types, and the acquisition and processing of climate data. This information was integrated into the SWAT+ model, followed by sensitivity analysis, model calibration and validation, scenario development, and the construction of flow duration curves. The results include maps of digital elevation models, Hydrologic Response Units (HRUs), and streamflow time series generated by the model. The simulation covered the period from January 1, 2007, to December 31, 2023. In the initial stage, prior to calibration, the quality indices of the simulation (NSE, PBIAS, and R²) indicated unsatisfactory performance. However, after sensitivity analysis, calibration, and validation, the indices were adjusted to satisfactory levels, demonstrating the model's ability to represent the region's hydrological behavior. Following this, two scenarios were simulated for each sub-basin. To assess water availability, the Q90 flow was used, obtained through flow duration curves. The results highlight a key issue in water resource management: during dry periods, water demand may exceed availability in these sub-basins, placing pressure on the public water supply system. Thus, the SWAT+ model proved to be a viable and efficient tool to support water resource planning and management, standing out as a valuable instrument for watershed management and integrated planning.

Keywords: Hydrological modeling. Water availability. Water resources management. Water security. SWAT+ model.

LISTA DE SÍMBOLOS

BF_i - Total diário de fluxo de base (mm)

ET_i - Total diário evapotranspirado (mm)

$PERCO_i$ - Total diário percolado (mm)

$SURQ_i$ - Total diário de escoamento superficial (mm)

SW_0 - Conteúdo inicial de água no solo disponível para absorção das plantas (conteúdo inicial de água no solo – conteúdo de água no ponto de murcha permanente) (mm)

SW_t - Conteúdo final de água no solo (mm)

A - área da bacia de estudo (km^2)

Dew_ave - Temperatura média do ponto de orvalho

$HYDGRP$ - Grupo hidrológico do solo

$Month$ - O mês para o qual os dados climáticos ou de simulação estão sendo referenciados

$NLAYERS$ - Número de camadas de solo no modelo

Pcp_ave - Precipitação média mensal

Pcp_days - Número de dias com precipitação no mês ou ano.

Pcp_hhr - Precipitação acumulada em intervalos de meia hora

Pcp_sd - Desvio padrão da precipitação mensal

Pcp_skew - Assimetria da precipitação mensal, que indica a distribuição das precipitações ao longo do mês

$Prec$ - Total diário precipitado (mm)

q - vazão específica dada em ($\text{l/s} \times \text{km}^2$)

Q - vazão medida na bacia de referência (l/s)

Slr_ave - Radiação solar média diária ou mensal

$SNAM$ - Nome do cenário de modelagem

$SOL_AWC1, 2, 3$ - Capacidade de retenção de água (AWC - Available Water Capacity) para as camadas 1, 2 e 3

$SOL_KI, 2, 3$ - Condutividade hidráulica do solo nas camadas 1, 2 e 3

$SOL_Z1, 2, 3$ - Profundidade das camadas de solo

SOL_ZMX - Profundidade máxima do solo (em metros) utilizada para as simulações

$SOLZ_BD1, 2, 3$ - Densidade aparente do solo nas camadas 1, 2 e 3, respectivamente

t = tempo (dias)

Tmp_max_ave - Temperatura máxima média mensal

Tmp_max_sd - Desvio padrão da temperatura máxima mensal

Tmp_min_ave - Temperatura mínima média mensal

Tmp_min_sd - Desvio padrão da temperatura mínima mensal

Wet_dry - Índice que distingue dias "úmidos" (com precipitação) e "secos" (sem precipitação)

Wet_wet - Consecutividade de dias úmidos

Wgn_id - Identificador de estação meteorológica ou de dados climáticos

Wnd_ave - Velocidade média do vento

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ARU - Alto Rio Uberabinha

CBH - Comitês de Bacia Hidrográfica

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CERH-MG - Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto

ETAs - Estações de Tratamento de Água

GNU - Licença Pública Geral

GPS - Sistema de Posicionamento Global

HRUs - Unidades de Resposta Hidrológica

ICWE - Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

MDE - Modelo Digital de Elevação

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

RBJ - Ribeirão Bom Jardim

SEGRH-MG - Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SNGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SR - Sensoriamento Remoto

SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

USDA-ARS - Agência de pesquisa científica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UTM - Projeção Transversa de Mercator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão hidrográfica segundo o CNRH.....	26
Figura 2 – Diagrama dos órgãos responsáveis pela gestão de recursos hídricos em âmbito Federal e Estadual.....	27
Figura 3 - Diagrama dos órgãos responsáveis pela gestão de recursos hídricos em âmbito estadual	28
Figura 4 - Cenários da Segurança Hídrica.....	31
Figura 5 – ISH (Índice de Segurança Hídrica) do Brasil para o ano 2035	32
Figura 6 - Estrutura vetorial e matricial de dados espaciais	34
Figura 7 - Processos para representação de um ciclo hidrológico.....	36
Figura 8 - Ilustração das HRUs no SWAT	42
Figura 9 - Esquema representativo do ciclo hidrológico	43
Figura 10 - Fluxograma metodológico	49
Figura 11 - Mapa de localização sub-bacias ARU e RBJ.....	50
Figura 12 - Mapa hipsométrico das sub-bacias	52
Figura 13 - Mapas de declividades das sub-bacias.....	53
Figura 14 – Mapa pedológico das sub-bacias.....	54
Figura 15 - Uso e ocupação da terra das sub-bacias.....	55
Figura 16 - Zonas climáticas da sub-bacias.....	56
Figura 17 - Estações de monitoramento consideradas na simulação.....	58
Figura 18 - Outorgas deferidas para a Sub-bacia do Ribeirão Bom Jardim	60
Figura 19 - Outorgas deferidas para a Sub-bacia do Alto Rio Uberabinha.....	61
Figura 20 – As 4 etapas da simulação no SWAT+.....	63
Figura 21 - Exemplo de formação das HRUs.....	64
Figura 22 - Precipitação mensal - período 2007 a 2023	78
Figura 23 – Dados climáticos – Período 2007 a 2023	78
Figura 24 - Série de medições - Vazão média mensal e precipitação média mensal	80
Figura 25 – Vazões máximas, mínimas e médias diárias monitoradas	81
Figura 26 - Vazões regionalizadas - Ribeirão Bom Jardim.....	82
Figura 27 - Delimitação das sub-bacias RBJ	83
Figura 28 - Delimitação da sub-bacia ARU	84

Figura 29 - Criação das HRUs – Sub-bacia RBJ.....	85
Figura 30 - Criação das HRUs – Sub-bacia ARU	86
Figura 31 - Quadro resumo da simulação RBJ.....	87
Figura 32 - Quadro resumo da simulação ARU	87
Figura 33 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023 (Sem calibração)	90
Figura 34 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023 (Sem calibração)	90
Figura 35 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, antes da calibração, sub-bacia RBJ	92
Figura 36 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, antes da calibração, sub-bacia ARU	92
Figura 37 – Ranking da relevância de 10 parâmetros para calibração de vazão	93
Figura 38 – Hidrograma de vazões após processo de calibração, considerando vazão calibrada e vazão regionalizada (Sub-bacia RBJ)	99
Figura 39 – Hidrograma de vazões após processo de calibração, considerando vazão calibrada e vazão observada (Sub-bacia ARU).....	99
Figura 40 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, pós calibração, sub-bacia RBJ	100
Figura 41 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, pós calibração, sub-bacia ARU	101
Figura 42 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023 (Calibrado e validado)	103
Figura 43 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023 (Calibrado e validado)	103
Figura 44 – Determinação das equações de correção das vazões simuladas.....	105
Figura 45 – Curvas de permanência para as vazões observadas e vazões simuladas corrigidas	106
Figura 46 – Curva de permanência do Cenário Atual para as sub-bacias	107
Figura 47 - Cenário 1 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023.....	108
Figura 48 - Cenário 1 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023	108

Figura 49 - Curva de permanência do Cenário 1 para as sub-bacias.....	109
Figura 50 – Cenário 2 – Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ – Período 2010-2023	110
Figura 51 – Cenário 2 – Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU – Período 2010-2023.....	110
Figura 52 - Curva de permanência do Cenário 2 para as sub-bacias.....	111
Figura 53 - Curvas de permanência - Cenários - Sub-bacia RBJ	112
Figura 54 - Curvas de permanência - Cenários - Sub-bacia ARU.....	113
Figura 55 – Análise comparativa dos Cenários – Hidrograma vazão média mensal – Sub-bacia RBJ	115
Figura 56 – Análise comparativa (Cenários e Outorgas) – Hidrograma vazão média mensal – Sub-bacia ARU.....	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Usos múltiplos da água	23
Quadro 2 – Abordagem e foco da conceituação de acordo com as diferentes disciplinas	29
Quadro 3 - Relação entre as áreas e seus principais modelos hidrológicos.	39
Quadro 4 - Uso e ocupação do solo SWAT+	65
Quadro 5 – Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade, limite inferior, limite superior dos parâmetros e método de variação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Critérios finais de avaliação de desempenho para as medidas estatísticas de desempenho recomendadas para modelos em escala de bacia hidrográfica e de campo.	47
Tabela 2 – Parâmetros de solos para inserção no banco de dados do SWAT+.....	66
Tabela 3 - Resumo das precipitações anuais para criação do Cenário 1	74
Tabela 4 - Comparativo do percentual de uso do solo para criação do Cenário 2 – Sub-bacia RBJ	75
Tabela 5 – Comparativo do percentual de uso do solo para criação do Cenário 1 – Sub-bacia ARU.....	76
Tabela 6 - Dados meteorológicos calculados para as sub-bacias	79
Tabela 7 – Resumo dos parâmetros climáticos	88
Tabela 8 – Resultado do índice de qualidade das simulações antes da calibração.....	91
Tabela 9 - Valores dos parâmetros na calibração automática com os respectivos limites inferiores, superiores e o valor calibrado	95
Tabela 10 - Resultado do índice de qualidade das simulações para o período de calibração ..	98
Tabela 11 - Resultado do índice de qualidade das simulações após a calibração e a validação	102
Tabela 12 – Análise comparativa dos cenários – Vazões máximas, médias e mínimas	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	18
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	21
2.1.1	<i>Conceitos e definições.....</i>	21
2.1.2	<i>Múltiplos usos da água</i>	22
2.1.3	<i>Disponibilidade hídrica.....</i>	24
2.1.4	<i>Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil.....</i>	25
2.1.5	<i>Gerenciamento de recursos hídricos em Minas Gerais</i>	27
2.1.6	<i>Segurança hídrica</i>	28
2.2	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)	33
2.2.1	<i>SIG e Geoprocessamento</i>	33
2.2.2	<i>Representação de dados.....</i>	34
2.2.3	<i>QGIS.....</i>	35
2.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	35
2.3.1	<i>Classificação</i>	37
2.3.2	<i>SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....</i>	40
2.3.3	<i>Ciclo Hidrológico.....</i>	43
2.3.4	<i>Análise de sensibilidade, calibração e validação</i>	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	ÁREA DE ESTUDO DAS SUB-BACIAS MODELADAS	50
3.1.1	<i>Hipsometria e declividade.....</i>	51
3.1.2	<i>Pedologia</i>	53
3.1.3	<i>Uso e cobertura da terra.....</i>	55
3.1.4	<i>Zonas climáticas.....</i>	56
3.2	DADOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS	57
3.2.1	<i>Regionalização de vazões para sub-bacia RBJ.....</i>	58

3.3	OUTORGAS EXISTENTES	59
3.4	<i>SOFTWARES UTILIZADOS.....</i>	62
3.5	DADOS DE ENTRADA NO MODELO SWAT	62
3.5.1	<i>Delimitação das bacias hidrográficas</i>	63
3.5.2	<i>Definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs).....</i>	64
3.5.3	<i>Inserção de dados climáticos – SWAT+ Editor</i>	67
3.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	68
3.7	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	71
3.8	CURVA DE PERMANÊNCIA.....	72
3.9	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA 72	
3.9.1	<i>Cenário Atual (Cenário 0)</i>	73
3.9.2	<i>Cenário de redução de precipitação (Cenário 1)</i>	73
3.9.3	<i>Cenário de alteração no uso do solo (Cenário 2).....</i>	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	77
4.1.1	<i>Estação climáticas.....</i>	77
4.1.2	<i>Estação fluviométrica.....</i>	79
4.2	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	81
4.3	AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NO MODELO SWAT	82
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS (SEM-CALIBRAÇÃO)	89
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	93
4.6	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	94
4.7	VALIDAÇÃO	100
4.8	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA 106	
4.8.1	<i>Cenário Atual (Cenário 0)</i>	106
4.8.2	<i>Cenário de redução de precipitação (Cenário 1)</i>	107
4.8.3	<i>Cenário de alteração no uso do solo (Cenário 2).....</i>	109
4.8.4	<i>Análise Comparativa dos Cenários e Disponibilidade Hídrica das Sub-bacias .</i> 112	
4.8.5	<i>Cálculo do Índice de Demanda Hídrica Superficial (IDHS)</i>	116
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
	REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas podem ser definidas como porções do espaço nos quais as águas das chuvas, subterrâneas ou mesmo de outros rios escoam para um determinado curso de água. Uma bacia é separada de outra pelos divisores de água, por esse motivo é possível que se avalie os parâmetros de produção de água para cada porção, permitindo simulações e planejamento dos seus recursos. Para as simulações consideram-se os parâmetros de intensidade e variação espaço-temporal dos processos hidrológicos. Dentre os processos para obtenção de modelos de análise estão os parâmetros de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, escoamento superficial, lateral e subterrâneo, dentre outros (VIANA *et al.*, 2020).

Di Silva (2016), defende que uma gestão adequada de recursos hídricos demanda uma ampla base de dados coletados em campo, entretanto sabe-se que geralmente esses dados são inexistentes ou mesmo ineficientes, visto que o número de estações pluviométricas e fluirométricas que estão em operação no Brasil com séries consistentes ainda são reduzidas. Uma alternativa para apoiar na tomada de decisões e auxiliar no entendimento de processos seria a aplicação de modelos que possam estimar o comportamento hidrográfico de uma bacia.

Sabe-se que as bacias hidrográficas são sensíveis às mudanças na cobertura vegetal, pois as alterações na vegetação interferem nas propriedades do solo, consequentemente, impactam a qualidade e as características da água dos rios (BALBINOT, 2018). O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) (2014), aponta ainda que o conhecimento que se tem dos sistemas ambientais é um dos papéis da ciência na adaptação às mudanças climáticas também, segundo o documento, a complexa quantificação dos riscos dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e setores afins dependem intrinsecamente desse conhecimento.

A utilização de modelos matemáticos, que realizam avaliações ambientais, possibilita que se avalie e se compreenda o comportamento de processos de forma que seja possível prever cenários e estimar a dimensão de uma alteração ambiental. Um exemplo de modelo que tem se mostrado adequado para simulações hidrológicas em bacias é o SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*) que integrado a um *software* de SIG (Sistema de Informação Geográfica) é capaz de realizar a simulação de períodos consideravelmente longos de série de vazão de forma

contínua. Neste trabalho, o SWAT+ será utilizado com intuito de analisar a disponibilidade hídrica de duas sub-bacias importantes para a cidade de Uberlândia-MG.

As sub-bacias do Ribeirão Bom Jardim e do Alto Rio Uberabinha, foco deste estudo, estão situadas a montante das captações das ETAs (Estações de Tratamento de Água) Bom Jardim e Sucupira, responsáveis pelo suprimento de água da cidade de Uberlândia. Por meio de modelagens hidrológicas dessas sub-bacias esse estudo avaliará a disponibilidade hídrica nas áreas de contribuição dos mananciais que abastecem a cidade. Os resultados obtidos demonstrarão a relevância estratégica dessas áreas no contexto do abastecimento público, além de identificar os períodos críticos do ano, em que a oferta hídrica em alguns anos pode ser insuficiente para atender à demanda, especialmente nos períodos de estiagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a disponibilidade hídrica de duas sub-bacias inseridas na cidade de Uberlândia-MG, por meio do modelo SWAT+, visando estudar a disponibilidade hídrica durante o período de 2007 a 2023, e apoiar análises de avaliação de práticas de gestão dos recursos hídricos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compilar e processar os dados espaciais e temporais pertinentes ao estudo das sub-bacias do ARU (Alto Rio Uberabinha) e do RBJ (Ribeirão Bom Jardim);
- Avaliar os dados de outorga existentes nas sub-bacias;
- Gerar um modelo que estuda a disponibilidade hídrica utilizando o SWAT+, realizar a análise de sensibilidade, calibração e validação dessas informações ao longo da série histórica;
- Desenvolver dois cenários de disponibilidade hídrica para cada sub-bacia baseados nas séries de vazões simuladas calibradas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando a implementação do SNGREH (Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos), pela Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que visa a gestão integrada, descentralizada e participativa dos recursos hídricos, objetivando garantir a disponibilidade hídrica com qualidade adequada e uso racional das águas, e também a implementação do SEGRH-MG (Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais) implementado pela Lei 13.199 de 29 de janeiro de 1999, com objetivo semelhante ao SNGREH com foco na realidade do estado de Minas Gerais, ambos criados para gerir de forma sustentável os recursos hídricos no Brasil e no estado de Minas Gerais, e considerando ainda os múltiplos usos da água, observa-se a relevância de estudos acadêmicos relacionados aos gerenciamentos de recursos hídricos no fornecimento de base científica que possa contribuir no desenvolvimento de planos de gerenciamentos pelos tomadores de decisões.

Este trabalho realiza uma modelagem hidrológica, utilizando o modelo SWAT+ e o *software* QGIS, para avaliar a disponibilidade hídrica de duas sub-bacias de grande importância para o abastecimento da cidade de Uberlândia-MG. Essas duas sub-bacias foram responsáveis até o ano de 2021 por todo o abastecimento público de água potável da cidade, até que em agosto de 2021 inaugurou-se a terceira captação para o abastecimento de Uberlândia, que faz a captação no Rio Araguari, ao norte da cidade, conhecida por ETA Capim Branco.

O Sistema de Captação de Água de Capim Branco começou a ser planejado nos anos de 1990, nessa época foi firmado um convênio pelo então prefeito da cidade com a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) para que Uberlândia pudesse realizar a captação de água no Rio Araguari. O projeto inicial previa a captação na represa de Miranda, entretanto devido à distância e ao desnível, a represa Capim Branco se mostrou mais adequada para a implementação desse projeto e foi escolhida como solução para executar essa obra. O atual sistema da ETA Capim Branco começou a operar com capacidade total de 2 mil litros por segundo, e possui uma capacidade de expansão para 6 mil litros por segundo (DMAE, 2023).

O presente trabalho busca avaliar a situação de segurança hídrica que a cidade estaria caso não houvesse essa terceira captação. A pesquisa será embasada em simulações que consideraram os dados das sub-bacias responsáveis pelo abastecimento de Uberlândia, como mapas

hipsométricos, de declividade, mapas pedológicos, de uso e ocupação do solo, dados climáticos e informações hidrometeorológicas. É importante ressaltar que ainda que a captação no Rio Araguari seja hoje uma realidade para o Município de Uberlândia, o abastecimento pelos outros dois reservatórios não deixam de ser providenciais na garantia do atendimento à população, visto que o custo de captação e operação dessas duas ETAs é significativamente inferior ao custo da captação da ETA Capim Branco devido à sua localização, que está a uma maior distância da cidade de Uberlândia.

Para atingir os objetivos descritos, este trabalho está estruturado em cinco partes, iniciando-se pela introdução que faz uma breve discussão do tema do trabalho, discorrendo de modo geral sobre a utilização das bacias hidrográficas, os múltiplos usos da água e cenário atual da segurança hídrica. Ainda na introdução são descritos também os objetivos do trabalho, bem como sua justificativa. Já a segunda parte consiste na fundamentação teórica a respeito do tema, que foi dividida em três tópicos principais: gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas, SIG e modelagem hidrológica. Na terceira parte foram descritos os procedimentos metodológicos utilizados no trabalho, como fonte dos dados, tratamento dos dados para inserção no modelo SWAT, etapas da simulação dentro do *software*, etapas para realização de análises de sensibilidade, calibração e validação, além da metodologia utilizada para estudar a disponibilidade hídrica. A quarta etapa discorre sobre resultados obtidos a partir das simulações buscando compreender a dinâmica hidrológica das sub-bacias e avaliar a demanda e a disponibilidade hídrica. Por fim, na conclusão são feitas as considerações a respeito da pesquisa e depois as referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

2.1.1 Conceitos e definições

Preliminarmente, é importante definir a diferenciação entre os conceitos de água e recursos hídricos. De acordo com EMBRAPA (2024), enquanto a água representa o elemento natural que não se vincula a qualquer tipo de utilização, o recurso hídrico representa a água como um bem econômico, que pode ser empregado a um determinado uso ou atividade.

Com isso, ainda que esse seja um recurso renovável, é também um recurso finito e não possui ocorrências exatas, tendo ainda distribuição irregular no tempo e no espaço. No Brasil, o maior volume de água, cerca de 80%, concentra-se no norte do país, região menos habitada do Brasil. Em contrapartida a região sudeste, embora seja a segunda menor em extensão territorial abriga os maiores contingentes populacionais e enfrenta maior escassez relativa de água doce (ANA, 2017).

Considerar a água como um recurso finito foi um dos princípios estabelecidos na ICWE (Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente), realizada em Dublin (Irlanda), em janeiro de 1992, cujo objetivo foi abordar questões críticas relacionadas a esse recurso e ao meio ambiente em um evento preparatório para a Conferência Rio 92, preparado pela Organização das Nações Unidas (SAITO, 2018).

A ICWE em Dublin se tornou conhecida mundialmente por tratar das questões de demanda e oferta de água de maneira integrada e do papel crucial das partes interessadas na gestão dos recursos hídricos, abordando ainda questões de qualidade da água e saneamento. Após essa conferência, muitas outras foram realizadas com o objetivo de estabelecer bases para discussões sobre o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos.

De acordo com CID (2023), a gestão de recursos hídricos trata-se de uma área complexa e desafiadora, envolvendo muitos objetivos que podem se mostrar conflitantes. Diante disso, é importante compreender que muitas vezes as relações naturais e sociais não seguem uma lógica

previsível. A compreensão dessa complexidade permite identificar que os elementos envolvidos estão interconectados e que ações em um local podem gerar impactos em outro local.

Leal (2000) em sua tese de doutorado a respeito da gestão de recursos hídricos no Pontal de Paranapanema (SP), sintetiza o conceito elaborado por diversos autores resumindo que: “gerenciar águas consiste em trabalhar com diversos processos naturais e sociais, com abordagem sistêmica, com o objetivo de compatibilizar e garantir água para os múltiplos usos, para as atuais e futuras gerações”. Ainda que haja certa diferenciação ao tratar sobre a gestão dos recursos hídricos, algumas propostas são entendidas como consolidadas pelos autores: a falta da água associada aos seus múltiplos usos; necessidade de planejamento e administração; influência política na gestão; estrutura institucional com participação dos usuários.

2.1.2 Múltiplos usos da água

Os usos das águas podem ser divididos em duas formas principais, com derivação de águas ou sem derivação de águas. Nos casos em que ocorrem as derivações de água, as finalidades de uso estão voltadas para: abastecimento urbano, industrial, irrigação, abastecimento doméstico ou dessedentação de animais e aquicultura. Para os casos em que não ocorrem derivações de águas as finalidades principais são para geração hidrelétrica, navegação fluvial, recreação, lazer e harmonia paisagística, pesca, assimilação de esgotos, usos de preservação.

O Quadro 1, criado por Barth (1987), apresenta de forma sistemática os múltiplos usos das águas expondo algumas características como: existência de derivação no curso natural, finalidade e tipos de uso, perdas por uso consultivo da água, requisitos de qualidade exigidos para cada uso, efeitos da utilização na alteração da qualidade.

Quadro 1- Usos múltiplos da água

Forma	Finalidade	Tipos de uso	Uso consuntivo	Requisitos de qualidade	Efeitos nas águas
Com derivação de águas	Abastecimento urbano	Abastecimento doméstico e industrial comercial e público	Baixo, de 10% sem contar as perdas nas redes	Altos ou médios, influindo no custo do tratamento	Poluição orgânica e bacteriológica
	Abastecimento industrial	Sanitário, de processo, incorporação ao produto, refrigeração e geração de vapor	Médio, de 20% variando com o tipo de uso e de indústria	Médios, variando com o tipo de uso	Poluição orgânica, substâncias tóxicas, elevação de temperatura
	Irrigação	Irrigação artificial de culturas agrícolas segundo diversos métodos	Alto, de 90%	Médios, dependendo do tipo de cultura	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
	Abastecimento	Doméstico ou para dessementação de animais	Baixo, de 10%	Médios	Alterações na qualidade com efeitos difusos
	Aquicultura	Estações de piscicultura e outras	Baixo, de 10%	Altos	Carreamento de matéria orgânico
Sem derivação de águas	Geração hidrelétrica	Acionamento de turbinas hidráulicas	Perdas por evaporação do reservatório	Baixos	Alterações no regime e na qualidade das águas
	Navegação fluvial	Manutenção de calados mínimos e eclusas	Não há	Baixos	Lançamento de óleos e combustíveis
	Recreação, lazer e harmonia paisagística	Natação e outros esportes com contato direto, como iatismo e motonáutica	Lazer contemplativo	Altos, especialmente recreação de contato primário	Não há
	Pesca	Com fins comerciais de espécies naturais ou introduzidas através de estações de piscicultura	Não há	Alto, nos corpos de água, correntes, lagos ou reservatórios artificiais	Alterações na qualidade após mortandade de peixes
	Assimilação de esgotos	Diluição, autodepuração e transporte de esgotos urbanos e industriais	Não há	Não há	Poluições orgânicas, físicas, químicas e bacteriológicas
	Usos de preservação	Vazões para assegurar o equilíbrio ecológico	Não há	Médios	Melhoria da qualidade da água

Fonte: Adaptado Barth, (1987).

2.1.3 Disponibilidade hídrica

Um dos principais desafios na hidrologia é o de conhecer adequadamente os processos hidrológicos. Os parâmetros quantitativos podem ser analisados com o estudo das variáveis hidrológicas. No caso do estudo da disponibilidade hídrica de uma bacia, por exemplo, a vazão dos cursos d'água é a principal variável de caracterização quantitativa.

Pinto et al., (1973), caracteriza a vazão de um curso de água em dois componentes, são eles: escoamento superficial e pelo afluxo de água do subsolo, ou escoamento de base. De acordo Lima (2008), a precipitação, entendida como a chuva direta que cai nos cursos d'água, proporcionalmente, é considerada a que menos contribui para a descarga da microbacia, já que a proporção de área líquida e superfície total da bacia é pequena. Já o escoamento superficial, considera a fração que não infiltra no solo e escoa superficialmente para o canal mais próximo.

O escoamento subsuperficial representa a maior parte do escoamento direto da chuva, esse considera a água que após a infiltração vai escoando lateralmente na direção da declividade. Por fim, o escoamento de base, também chamado de subterrâneo, em geral é proveniente do aquífero. Nesse tipo, após uma precipitação, depois que todo escoamento direto já deixou a bacia, o escoamento de base se torna o único componente da vazão.

É chamado de hidrograma a representação gráfica que ilustra a variação de vazão em uma determinada seção em função do tempo. O formato do hidrograma depende não só da precipitação como também de características fisiográficas, climáticas e vegetais que governam a relação entre precipitação e vazão nas bacias (OLIVEIRA, 2014).

De acordo com Back, Zambrano e Corseuil, (2019), a caracterização da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica consiste da coleta das vazões médias anuais de um rio mostrada a partir de funções de probabilidades das médias diárias de todas as vazões que ocorreram no ano ou período de tempo ou ainda pode ser avaliada pela análise das vazões de referência verificadas em períodos de seca que refletem o potencial disponível para os múltiplos usos, são elas:

- Q_{90} : A vazão verificada em um posto fluviométrico em certo período de tempo, em que em 90% daquele período as vazões foram iguais ou superiores a esse valor;

- Q_{95} : Possui o mesmo significado da Q_{90} , entretanto considerada que a vazão do corpo hídrico é igual ou superior a aquele valor em 95% do tempo observado;
- $Q_{7,10}$: Consiste na vazão mínima de 7 dias consecutivos em um período de recorrência de 10 anos e é amplamente utilizada. Trata-se de um parâmetro probabilístico.

De acordo com Oliveira (2014), além das vazões mínimas, as vazões máximas também são importantes a depender do estudo da bacia que está sendo realizado. Esse parâmetro é estudado por sua ocorrência e tempo de recorrência. Para o estudo de obras hidráulicas como vertedores, canais, diques de proteção contra inundações e até para o dimensionamento de represas, o conhecimento das vazões máximas são fundamentais para a concepção dos projetos.

No que diz respeito às alterações de vazões em uma bacia hidrográfica, não só o parâmetro climático, que são os períodos de seca e de chuva, deve ser considerado. Apesar de esse ser um importante parâmetro, os fatores fisiográficos que incluem as características de relevo e solo e também o uso da terra são importantes fatores a serem estudados. O uso da terra pode inclusive ser considerado como um dos fatores mais importantes nas alterações do comportamento hidrológico (LIMA e ZAKIA, 2006).

2.1.4 Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil

No Brasil, considera-se como marco legal do gerenciamento integrado dos recursos hídricos, o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal de 1988, ao estabelecer a dominialidade das águas. Posteriormente regulamentado pela Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, conhecida como “Lei das águas”, que institui a PNRH (Política Nacional de Recursos Hídricos) e cria o SINGREH (Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos).

Na implementação da PNRH alguns fundamentos foram estabelecidos. Dentre esses estão a definição da água como bem de domínio público, um recurso natural limitado e dotado de valor econômico; a determinação que em situações de escassez, o seu uso prioritário é para atender ao consumo humano e a dessedentação de animais; a determinação da bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do SINGREH; a determinação que a gestão de recursos hídricos deve ser feita de maneira descentralizada e com a participação do poder público, usuários e da comunidade.

O CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) é a instância máxima do SINGREH, sendo responsável pela elaboração das regras gerais para a gestão das águas. O CNRH por meio da Resolução nº 32 de 15 de outubro de 2003, instituiu a divisão hidrográfica nacional em 12 regiões com finalidade de orientar a implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos. São elas: a Região Amazônica, Região do Atlântico Nordeste Ocidental, Região do Atlântico Nordeste Oriental, Região do Parnaíba, Região do Tocantins Araguaia, Região do São Francisco, Região do Atlântico Leste, Região do Atlântico Sudeste, Região do Paraguai, Região do Paraná, Região do Uruguai, Região do Atlântico Sul. A Figura 1 ilustra essa delimitação.

Figura 1 - Divisão hidrográfica segundo o CNRH



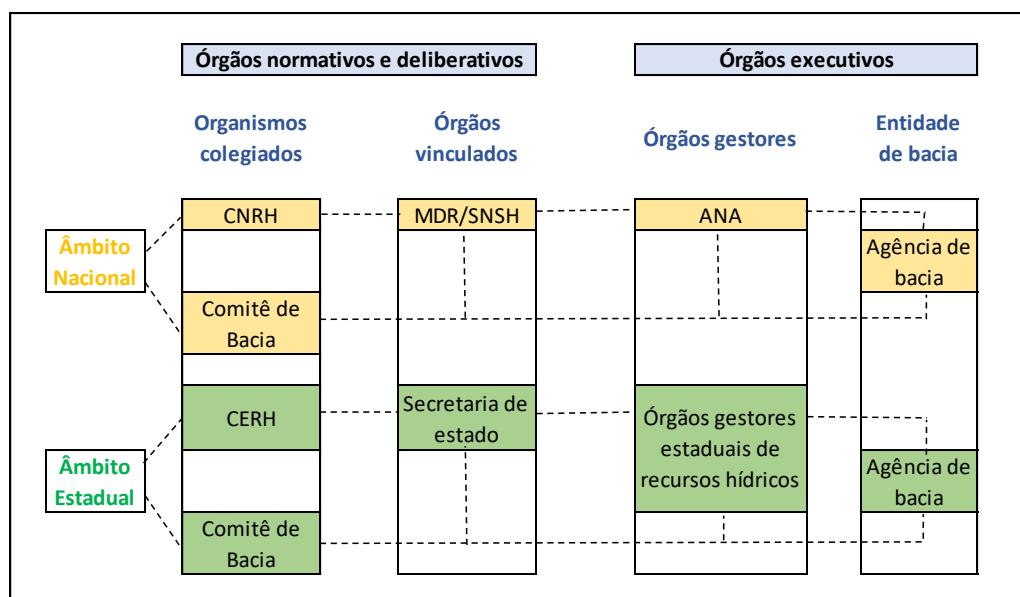
Fonte: ANA, (2023).

A ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico), faz parte dos órgãos gestores, foi criada por meio da Lei Federal nº 9984/2000 e possui como uma de suas competências a

implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos nas bacias hidrográficas interestaduais e também de coordenar as ações do SINGREH.

Os CBHs (Comitês de Bacia Hidrográfica) dentro do SINGREH, em nível nacional e estadual, são órgãos colegiados que possuem atribuições normativas, consultivas e deliberativas a partir de uma jurisdição específica. Os comitês desempenham papéis importantes no gerenciamento desses recursos quando favorece a participação dos usuários e de comunidades específicas. Fazem parte de sua constituição interna os representantes da União, dos estados e do Distrito Federal. Nos casos em que existam rios fronteiriços o comitê possui gestão compartilhada com outro país (Brito e Missio, 2019). A Figura 2 ilustra essas disposições descritas.

Figura 2 – Diagrama dos órgãos responsáveis pela gestão de recursos hídricos em âmbito Federal e Estadual



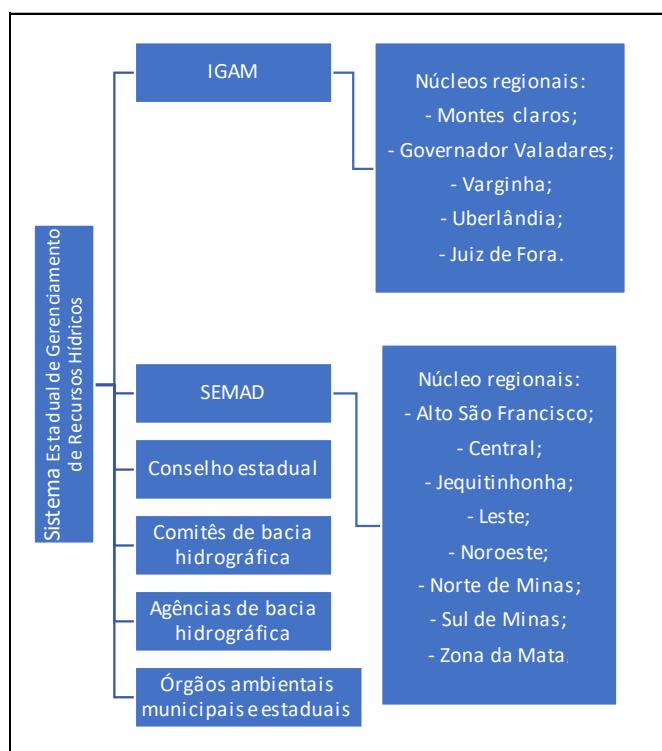
Fonte: Adaptado ANA, (2021).

2.1.5 Gerenciamento de recursos hídricos em Minas Gerais

O Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais (SEGRH-MG) foi implementado por meio da Lei 13.199 de 29 de janeiro de 1999. Essa lei, além de fundamentar os múltiplos usos da água e da garantia de acesso de todos ao recurso hídrico, também atribui valor ecológico, econômico e social, e estabelece a bacia hidrográfica como unidade física de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Atualmente integram o SEGRH-MG, a SEMAD (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável), o CERH-MG (Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais), o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas), os comitês de bacia, órgãos e entidades dos poderes estadual e municipal e as agências de bacias hidrográficas (IGAM, 2024). A Figura 3 ilustra essa composição.

Figura 3 - Diagrama dos órgãos responsáveis pela gestão de recursos hídricos em âmbito estadual



Fonte: Adaptado IGAM, (2024).

2.1.6 Segurança hídrica

Até meados do século XX, a preocupação com a extensa exploração dos recursos naturais pelo homem não era difundida entre a população brasileira ou global. Foi com o passar dos anos que os cientistas, intelectuais, ativistas, políticos e a sociedade em geral começaram a se conscientizar sobre os impactos negativos da exploração desenfreada. Essa percepção foi impulsionada pelas evidências de que o estilo de vida de muitos locais ao redor do mundo não

era sustentável, nem sob o ponto de vista ambiental e nem para as futuras gerações (CASTRO, 2022).

A partir disso, por volta dos anos de 1990, a expressão “segurança hídrica” começou a ser encontrada na literatura inglês. Em um trabalho desenvolvido por Bakker (2012), se demonstra o crescente interesse da comunidade acadêmica sobre esse assunto, estima-se que entre os anos de 1992 e 2012 foram publicados mais de quatrocentos artigos científicos em revistas acadêmicas, sendo que mais da metade foram publicados a partir de 2007. Nesse período, o conceito de segurança hídrica foi sendo proposto de diferentes formas de acordo com o assunto a ser abordado.

Nos trabalhos desenvolvidos por Cook e Bakker (2012), foram analisados 418 artigos acadêmicos que indicaram tendências de priorização sobre determinados aspectos no âmbito da segurança hídrica em função das áreas do conhecimento a serem abordadas no trabalho. O Quadro 2 ilustra essas tendências. Entretanto, apesar de não existir uma definição única, alguns elementos sempre estiveram presentes, como a escassez de água, considerando seus múltiplos usos, a qualidade da água e os excessos de inundações (CASTRO, 2022).

Quadro 2 – Abordagem e foco da conceituação de acordo com as diferentes disciplinas

Disciplina	Foco do conceito de segurança hídrica
Agricultura	Água como insumo para produção agrícola e como elemento relacionado à segurança alimentar.
Engenharia	Proteção contra riscos relacionados à água (enchentes, secas, contaminação, terrorismo); e segurança da oferta hídrica (como percentual da demanda atendida).
Ciência ambiental	Acesso das funções e dos serviços da água para os seres humanos e para o ambiente.
Saúde pública	Segurança da oferta e acesso à água potável; e prevenção e monitoramento da contaminação da água em sistemas de distribuição.
Recursos pesqueiros, geologia, geociências, hidrologia	Variabilidade hidrológica da água subterrânea; e segurança de todo o ciclo hidrológico.
Antropologia, economia, geografia, história, direito, administração, ciência política	Segurança da infraestrutura da água de beber; insumo para a produção de alimentos e para a saúde e o bem-estar dos seres humanos; conflitos armados (como elemento legitimador de ações militares e como barreira para a cooperação e a paz entre países); e minimização da vulnerabilidade dos domicílios com relação à variabilidade hidrológica.
Política	Elos interdisciplinares (produção de alimentos, clima, energia, economia e segurança humana); desenvolvimento sustentável; proteção contra riscos relacionados à água; proteção dos sistemas hídricos contra enchentes e estiagens; e desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos para garantir o acesso a funções e serviços da água.
Recursos hídricos	Escassez hídrica; segurança da oferta (gerenciamento da demanda); e segurança hídrica “verde” (<i>versus</i> “azul”). ¹

Fonte: Cook e Baker, (2012).

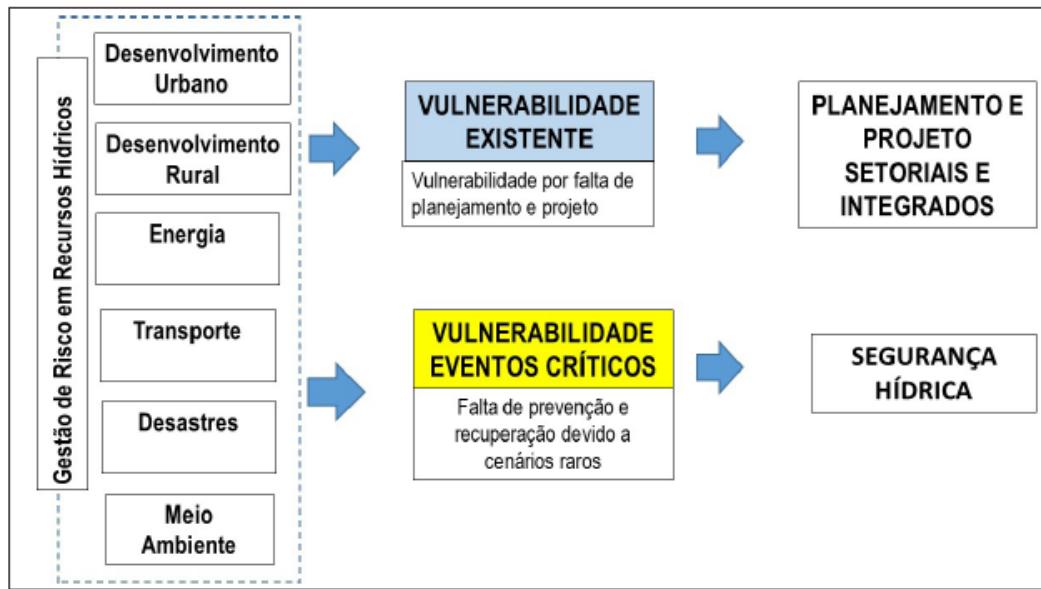
Foi no ano de 2000 em um Fórum Mundial da Água em Haia na Holanda, que os ministros representantes dos países presentes destacaram a segurança hídrica como um dos objetivos para a Gestão de Recursos Hídricos. No evento foi apresentada a seguinte definição para a expressão (GWP, 2000):

“A nível local ou global, cada pessoa tem acesso a água suficiente a um custo acessível para higiene e vida saudável e produtiva, assegurando simultaneamente que o ambiente natural está protegido e melhorado”

A segurança hídrica implica na gestão de riscos que envolve dois níveis, a gestão dos cenários de projetos e a resposta em situações de emergência. A nível de projetos, a gestão se relaciona ao planejamento e aos projetos de infraestrutura de disponibilidade hídrica para os múltiplos usos, sendo definida a probabilidade de atendimento ou de falha dentro desses. Já o nível relacionado à resposta em situações de emergência, envolve a previsão do risco superior ao de projeto. Por exemplo, um sistema de abastecimento é projetado para atendimento de 95%, entretanto em um cenário de falha (outros 5%) deverá existir um plano de emergência para garantir a segurança hídrica do projeto. O plano de emergência deve considerar alternativas e investimentos em casos de risco de falta ou excesso de água (TUCCI E CHAGAS, 2018).

Além disso, existe a classificação de dois grupos de cenários para a segurança hídrica feitos também por Tucci e Chagas, (2018). O primeiro que trata da vulnerabilidade causada pela falta de projeto, relacionando à falta de planos, projetos e programas que irão dar soluções para os problemas de qualidade, quantidade e relacionados à escassez hídrica. O segundo cenário diz respeito às vulnerabilidades em eventos críticos (emergências), envolvendo o cenário de falha, esses são relacionados a projetos para prevenção a situações críticas considerando a disponibilidade hídrica, as inundações e as condições críticas ambientais. A Figura 4 ilustra esses cenários.

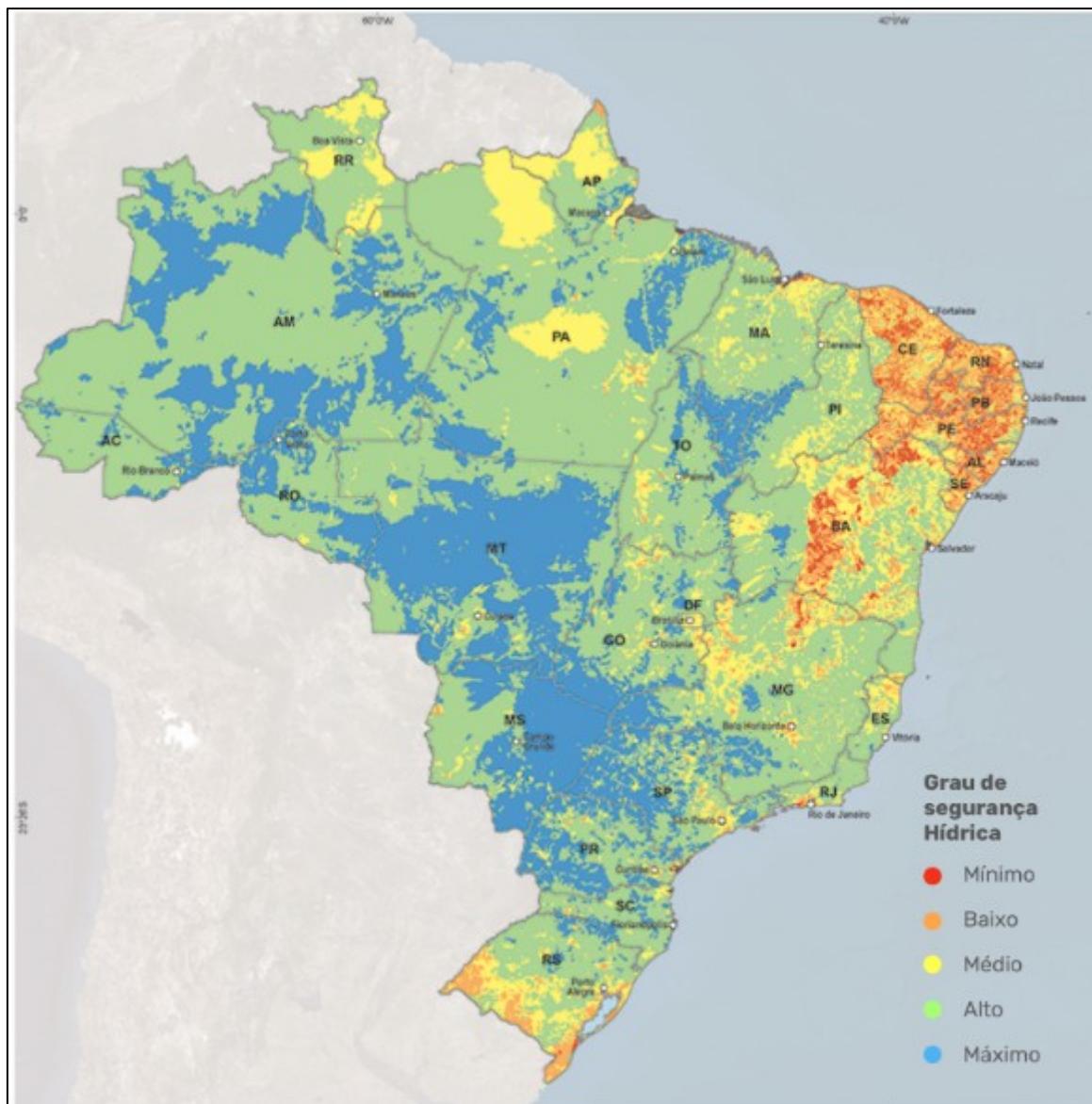
Figura 4 - Cenários da Segurança Hídrica



Fonte: Tucci e Chagas, (2018).

Tendo em vista as vulnerabilidades envolvidas no contexto da segurança hídrica, o PNSH, já explorado anteriormente, com o objetivo de estabelecer um diagnóstico para o Brasil criou o Índice de Segurança Hídrica do Brasil. Esse índice considera as quatro dimensões do conceito de segurança hídrica estabelecidas pela ONU. São eles: disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento das necessidades humanas, garantia para as práticas das atividades econômicas, preservação dos ecossistemas aquáticos e resiliência aos riscos de secas e cheias (ANA, 2019). Na Figura 5 está ilustrado o gráfico que demonstra a aplicação desse índice em uma projeção para o ano de 2035.

Figura 5 – ISH (Índice de Segurança Hídrica) do Brasil para o ano 2035



Fonte: ANA, (2019).

De acordo com o mapa, a região com menor segurança hídrica é o Nordeste, isso porque na região tem-se o impacto do clima semiárido, em que a disponibilidade hídrica é zerada em grande parte do ano, possuindo cursos d'água intermitentes e de grande variabilidade pluviométrica. Outra região de alerta é a metade sul do estado do Rio Grande do Sul, nesse local o índice baixo se deve a grande pressão sobre os recursos hídricos na região e a grande variabilidade pluviométrica (ANA, 2019).

No caso das regiões metropolitanas o baixo índice deve-se às elevadas demandas e má qualidade das águas poluídas pela falta de tratamentos adequados de efluentes. Por outro lado, as regiões que apresentam maior ISH se devem à maior disponibilidade hídrica natural combinada com pequena pressão de demandas, que se refletem em todas as dimensões.

A utilização de mapas como esse apresentado na Figura 5 são essenciais quando se busca apresentar uma variedade de informações geoespaciais e principalmente quando se deseja visualizar uma determinada tendência ou padrão de informações. O próximo tópico de SIG, tratará essa disciplina e as suas principais abordagens.

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Os SIG (Sistemas de Informações Geográficas) desempenham um papel fundamental no gerenciamento de recursos hídricos devido à sua capacidade de coletar, armazenar, analisar, gerenciar e exibir dados espaciais do mundo real para um propósito específico (BASE AEROFOTO, 2024). As possibilidades de armazenamento e gestão das informações em SIG são ilimitadas (DORCA, LUIZOTTO E ANDRADE, 2009), o que possibilita elaboração de mapeamentos detalhados, monitoramento e controle de qualidade das águas, modelagens hidrológicas, planejamento e gestão de bacias hidrográficas, e até amparo na tomada de decisões.

2.2.1 SIG e Geoprocessamento

Englobando o conceito de SIG está o geoprocessamento, de acordo com INPE, (2024), esse pode ser definido como o resultado da coleta e tratamento de informações espaciais para um objetivo específico, seja para a análise de planejamento urbano, dos recursos naturais, das comunicações, dos transportes dentre muitos outros aspectos. No tratamento de dados, o geoprocessamento utiliza técnicas ligadas a informações espaciais tais como: Topografia, Cartografia, Sensoriamento Remoto (SR), Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Em um país com extensões continentais como o Brasil, a utilização de geoprocessamento, por meio de imagens de satélites, fotografias aéreas, mapas, bancos de dados e aplicativos

específicos, representa uma ferramenta de grande importância na adoção de políticas públicas, na tomada de decisões envolvendo desenvolvimento e nas tratativas para problemas urbanos, rurais e ambientais (IBRAHIM, 2014).

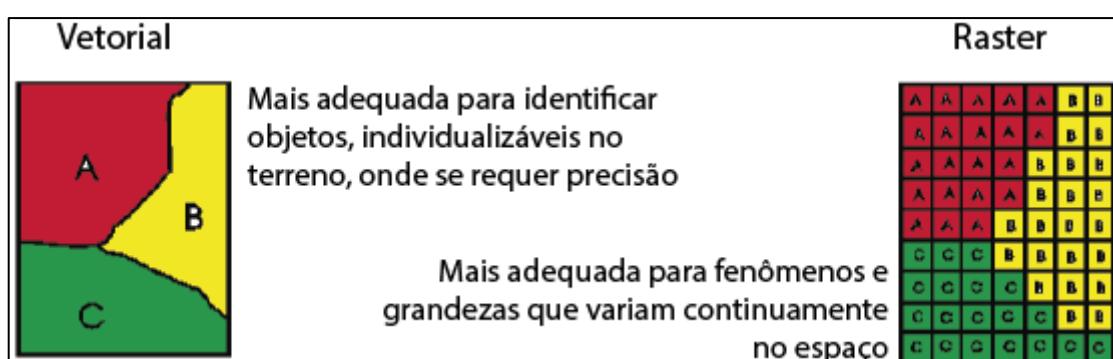
2.2.2 Representação de dados

Em relação à representação computacional, os dados podem ser de dois tipos principais, do tipo raster, também chamado de matricial, ou do tipo vetor (Kuntschik, 2020). A determinação do tipo de dado a se utilizar nesse caso, dependerá primordialmente do objetivo ao que o trabalho se destina, sendo assim, vários tipos de *software* permitem a utilização em conjunto desses tipos e também as suas conversões.

No caso dos dados em formato raster (matricial), o espaço é definido em forma de matriz, em que cada célula se associa a um par de coordenadas e um valor ou descrição de atributo. Quanto menor o tamanho da célula maior o potencial para a representação de detalhes. Com isso, ao se utilizar dados do tipo raster, um ponto a se destacar é que seja avaliado o tamanho dessas células, para que assim a precisão fique adequada ao que se deseja representar.

Já na representação vetorial os dados do mundo real são expressos a partir de pontos, linhas e polígonos definidos a partir de um par de coordenadas. Nessa estrutura, a área do mapa consiste em um espaço de coordenadas contínuas, onde as posições buscam definir com a maior precisão possível (Kuntschik, 2020), sendo consideradas matematicamente exatas. A Figura 6 ilustra a comparação entre os dois tipos de dados, vetoriais e raster.

Figura 6 - Estrutura vetorial e matricial de dados espaciais



Fonte: Barros, Geoaplicada, (2022).

2.2.3 QGIS

O QGIS, é um *software* de código aberto e gratuito, onde o usuário possui liberdade de acesso, uso, estudo, modificação e distribuição do código fonte. O QGIS foi criado em maio de 2002 por Gary Sherman, e tem sofrido constantes evoluções tornando-se atualmente uma das principais soluções na ampla gama de SIGs disponíveis (QGIS, 2024).

O QGIS pode ser utilizado nas plataformas *Linux*, *Unix*, *MAC OSC*, *Windows* e *Android* (IBGE, 2018), e permite a visualização de diferentes formatos de arquivos, como *shapefiles*, *GEOTIFF*, *KML*, dentre outros. Por meio desse *software* é possível visualizar, criar, editar, analisar dados geoespaciais e criar mapas dos mais diferentes tipos.

Como já explanado no item 2.2.2, para a manipulação dos dados geoespaciais que são carregados em ambientes SIG é necessário que se considere a estrutura de dados que será inserida. Se será do tipo vetorial, matricial ou mesmo um banco de dados para que se possa interpretar e analisar esses dados.

2.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

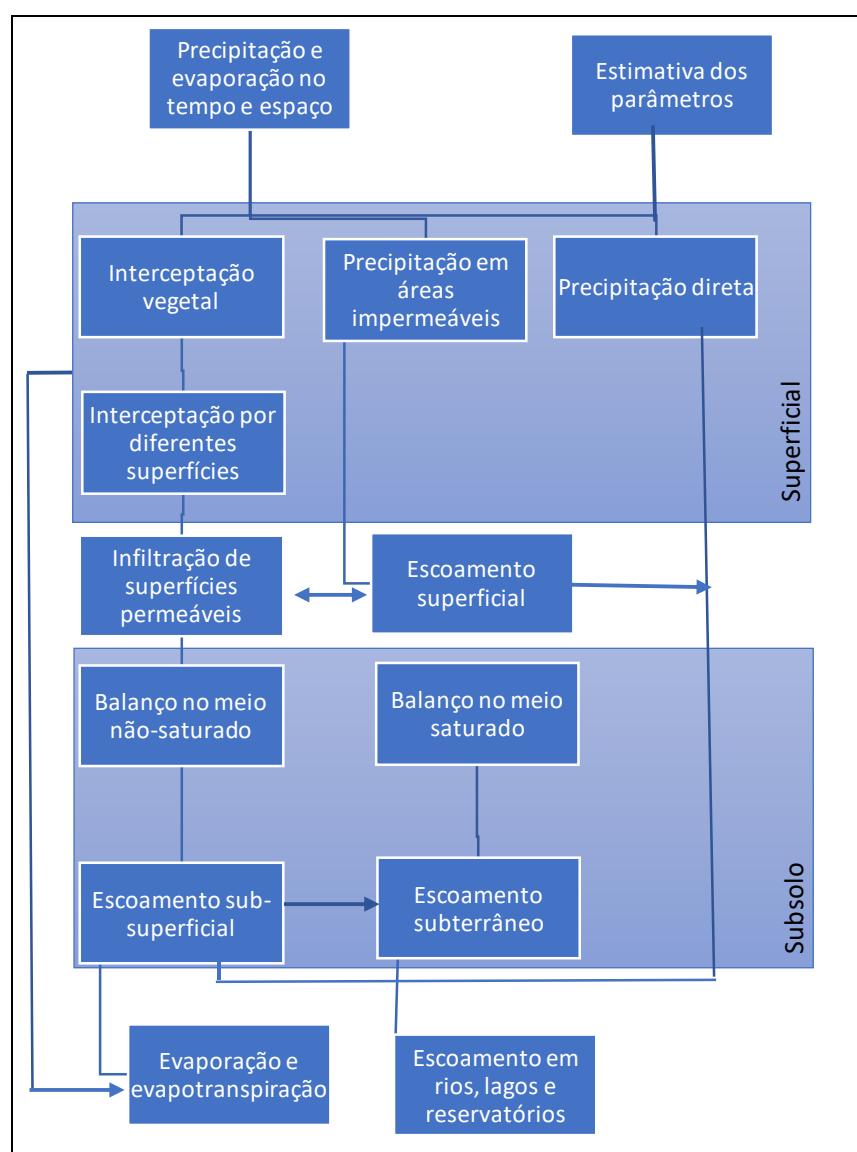
De acordo com Moraes (2003), a compreensão sobre os processos hidrológicos é fundamental para estudos que envolvem obras hidráulicas e gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com o autor, o tempo que a água permanece em diversos pontos da hidrosfera influencia em ocorrências, por exemplo, de disponibilidade hídrica, de ocorrência de inundações, da dinâmica de elementos, da concentração de poluentes e nutrientes, sendo a modelagem hidrológica utilizada como ferramenta para a previsão desses eventos/cenários.

Os modelos são representações e abstrações da realidade. De acordo com Mendes e Cirilo (2001), a imagem do mundo ao redor dos olhos, por exemplo, é um modelo, entretanto esse modelo é mais simples que o mundo real. Isso ocorre pois ao se fazer uma modelagem é necessário que algumas características sejam simplificadas ou mesmo ignoradas. Por isso, os autores defendem que para que se possa representar um modelo é necessário que se disponha

de alguns dispositivos que sirvam de auxílio às limitações humanas, como telescópio, microscópios, imagens de satélite, estações pluviométricas, dentre outros.

Compete à hidrologia o estudo de fenômenos naturais que ocorrem dentro do ciclo hidrológico, dentre eles: a precipitação, a evaporação, a infiltração e o escoamento em rios. O modelo hidrológico, de acordo com Tucci (1998), consiste em uma ferramenta utilizada para simular esses fenômenos dentro de uma bacia hidrográfica, avaliar as consequências das diferentes ocorrências e comparar aos valores observados. A Figura 7 mostra um fluxograma que estrutura os diferentes processos que fazem parte do ciclo hidrológico.

Figura 7 - Processos para representação de um ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado Tucci, (2005).

Um modelo hidrológico permite que sejam verificadas as consistências de informações disponíveis, que geralmente são limitadas, obtidas por meio de observações e com base nos dados do modelo os parâmetros podem ser calibrados de forma a possibilitar, por exemplo, que o modelo seja utilizado em uma bacia não monitorada.

Vale reforçar, que a compreensão da estrutura do modelo e suas limitações são fundamentais para que um modelo seja utilizado de forma adequada. O item 2.3.1 descreve a classificação dos modelos de acordo com Tucci, (1998).

2.3.1 Classificação

De acordo com Tucci (1998), os modelos hidrológicos podem ser classificados em:

- a) **Concentrado ou distribuído:** O modelo é chamado de concentrado quando não leva em conta a distribuição espacial da bacia, e dito como distribuído quando seus parâmetros dependem do espaço e do tempo.
- b) **Estocástico ou determinístico:** Quando a incerteza é uma consideração importante no modelo, esse é chamado de estocástico. Já quando o fator probabilidade é desconsiderado no modelo, e uma entrada possui as mesmas condições de saída, o modelo é definido como determinístico;
- c) **Conceitual ou empírico:** Os modelos são ditos conceituais quando consideram equações físicas em seus processos. Já os modelos empíricos utilizam as funções matemáticas e os dados observados, sem considerar explicitamente os processos físicos envolvidos. Dentro do modelo conceitual, é possível ainda classificar esse tipo em:
 - Semiconceitual: Quando o modelo é considerado como conceitual, entretanto possui razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas.
 - Físico: Utiliza as principais equações diferenciais do sistema físico na representação do processo. Os seus parâmetros são os que mais se aproximam da física do sistema.

Os modelos hidrológicos são importantes na predição e quantificação de fenômenos físicos que ocorrem na natureza, e por isso, também podem ser considerados como ferramentas necessárias para preencher diversas lacunas de necessidades no planejamento e gerenciamento dos Recursos Hídricos. A seguir estão elencados alguns desses recursos e aplicações (Lou, 2010):

- Analisar consistência e preencher falhas de dados observados: ao se coletar dados para análise de vazões é comum que existam séries mais longas de medições pluviométricas do que de vazões, por exemplo. Sendo assim, nas simulações e modelagens podem ser usadas as séries mais longas de precipitação e ajustar esses dados para o estudo de vazões.
- Predições de vazões: em estudos que não se tem os dados para vazão, um modelo hidrológico pode ser utilizado buscando postos de vazão a montante no local em que se deseja estudar. Nesse caso, o modelo deve utilizar o máximo de informações disponível para o local e inserir os parâmetros utilizados de outro ponto.
- Previsão de cenários de planejamento e dimensionamento: ao se conhecer os dados de precipitação e seus tempos de recorrência é possível modelar as vazões resultantes para usos variados da bacia, objetivando o dimensionamento e planejamento de alternativas para sua gestão.
- Efeitos da modificação do uso e ocupação do solo: esse tipo de modelagem de uso do solo é conhecido por ser um problema mais complexo, requerendo uma metodologia mais robusta. Vale lembrar que os modelos que estudam esses fenômenos são em sua maioria empíricos devido às dificuldades em considerar os processos físicos (LOU, 2010).

Fayal (2008), apresenta uma relação entre as diversas áreas envolvidas no uso da água e seus principais modelos hidrológicos. O Quadro 3 ilustra essas relações.

Vale lembrar, que o conceito de escolha de uma modelo “correto” inexiste nas aplicações de modelagens hidrológicas, entretanto Bennett et al., (2013) diz que o tipo de modelo a se utilizar é talvez uma das mais importantes no processo. Por esse motivo, estabelecer critérios básicos, como: avaliação do objetivo, escala, resolução do modelo, avaliação dos dados e desempenho do modelo devem ser feitos para uma escolha mais assertiva da modelagem a ser realizada.

Quadro 3 - Relação entre as áreas e seus principais modelos hidrológicos.

Área	Foco	Principais modelos
Desenvolvimento urbano	Abastecimento de água: regularização adução, tratamento e distribuição. Tratamento de esgoto: rede de coleta, tratamento, despejo do afluente, impacto ambiental do afluente em rios, lagos, reservatórios e oceanos. Drenagem urbana e controle de cheias: rede pluviais, obras hidráulicas e previsão de enchentes.	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; modelo hidráulico da rede de condutos. Hidráulica da rede coletora; qualidade da água de rios, reservatórios, lagos e estuários. Precipitação-vazão para dimensionamento e previsão de cheias; amortecimentos em reservatório; remanso de rios e canais; qualidade da água de redes pluviais.
Energia	Projeto e operação de hidrelétricas: disponibilidade hídrica, regularização para energia firme, projeto de vertedores, duques, condutos, previsão de afluência de vazões e operação hidráulica dos reservatórios em tempo real.	Precipitação-vazão para extensão de série temporal e previsão em tempo real para operação do sistema; balanço de reservatórios; hidráulico de rios e cainais; modelos de dispositivos hidráulicos.
Transporte	Navegação: canal de navegação; barragem e clausa; manutenção dos sistemas; níveis e calados; portos.	Precipitação-vazão para estimar a vazão; modelos de rios para estimativa do calado e de operação de barragem.
Controle de calamidades	Rompimento de barragens: eventos críticos; Cheias: alerta de população ribeirinha; Estiagens: racionamento para abastecimento urbano e irrigação.	Modelos hidráulicos de rompimentos de barragens; modelos precipitação-vazão e vazão-vazão em tempo real para estiagens e cheias.
Gerenciamento de recursos hídricos	Concessão do uso da água. Controle do uso e conservação da água.	Modelos de precipitação-vazão; regionalização de variáveis hidrológicas; modelos de balanço e escoamento em rios.
Sistemas de informações	Cadastro de usuários. Monitoramento de variáveis hidrológicas.	Modelos hidrológicos para preenchimento de falhas; precipitação-vazão; estatísticos.
Produção agrícola	Irrigação: disponibilidade hídrica, regularização, necessidade hídrica agrícola e distribuição.	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; balanço agrícola; projeto e otimização de rede de canais.
Controle ambiental	Impacto de obras hidráulicas: reservatórios, diques e polders. Impacto devido a despejo de afluentes: efluentes industriais e domésticos. Impacto devido a uso do solo rural e urbano: erosão do solo, impermeabilidade e rede de condutos.	Modelos hidráulicos e de qualidade da água de rios, reservatórios e de cargas difusas; hidráulicos e de qualidade da água de lagos e estuários; precipitação-vazão, erosão e transporte hídrico.

Fonte: Adaptado Fayal, (2008).

Com o desenvolvimento e tecnologia da computação foram sendo criados diversos *softwares* cada vez mais completos e complexos para realizar simulações e predições. Cada *software* possui suas peculiaridades e campos de aplicação. Zazoni (2023), elenca alguns *softwares* que se destacam nos estudos de engenharia de recursos hídricos. São eles: *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), *Geospatial Hydrologic Modeling Extension* (HEC-GeoHMS), *River Analysis System* (HEC-RAS), *Geographic River Analysis System* (HEC-GeoRAS), *Tank Model*, *Topography-Based Hydrological Model* (TOPMODEL), *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), Instituto de Pesquisas Hidráulicas II (IPH II), Modello Idrologico Semi-Distribuito in continuo (MISDc) e o Sacramento - Soil Moisture Accounting (SAC-SMA).

Dentre os *softwares* de modelagens hidrológicas que estudam a disponibilidade hídrica pode-se elencar o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) e o *Water Evaluation and Planning System* (WEAP) desenvolvidos nos Estados Unidos, e no Brasil podemos citar o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), todos esses podem simular vazões e são úteis na análise de disponibilidade hídrica, mas com diferentes níveis de complexidade e enfoque.

Ainda de acordo com Zazoni (2023), o modelo SWAT tem se mostrado adequado para simulações envolvendo uso e ocupação do solo, mudanças climáticas, estudos sobre disponibilidade hídrica e magnitude de eventos extremos, além disso o SWAT tem se mostrado um software bastante difundido nas simulações envolvendo segurança hídrica e muitos manuais, artigos e trabalhos vem sendo publicados a respeito da sua utilização. No Brasil, é possível observar publicações que simularam utilizando o modelo SWAT bacias que variam de pequenas a grandes extensões (JUNIOR, 2014; OLIVEIRA, 2014; RIBEIRO *et. al.*, 2015; SELL *et. al.*, 2022; ANTUNES *et. al.*, 2023; CECCONELLO *et. al.*, 2023; ZAZONI, 2023). Levando em conta essas considerações, esse será o *software* selecionado para ser utilizado neste trabalho.

2.3.2 SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*)

A sigla SWAT em português pode ser traduzida como, “Ferramenta de Avaliação de Solo e Água”. O *software* foi desenvolvido na década de 90 pela Pesquisa Agrícola do Departamento

de Agricultura dos Estados Unidos e pela Universidade Agrícola e Mecânica do Texas (*Agricultural Research Service - ARS of United States Department of Agriculture - USDA* e *Blackland Research Center da Texas A&M University*).

Inicialmente, o modelo SWAT foi desenvolvido com o objetivo de avaliar os efeitos da gestão alternativa sobre os recursos hídricos, sedimentos, nutrientes e pesticidas, com diferentes tipos de solo (ARNOLD et al., 2012). Entretanto, desde a sua criação, o modelo tem sido continuamente avaliado e aprimorado, e posteriormente esses progressos resultaram em um modelo que permite a simulação da quantidade e qualidade da água em bacias hidrográficas grandes e complexas, sendo possível prever o impacto da topografia, uso e manejo dos solos, estudo de sedimentos, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e elementos químicos agrícolas residuais.

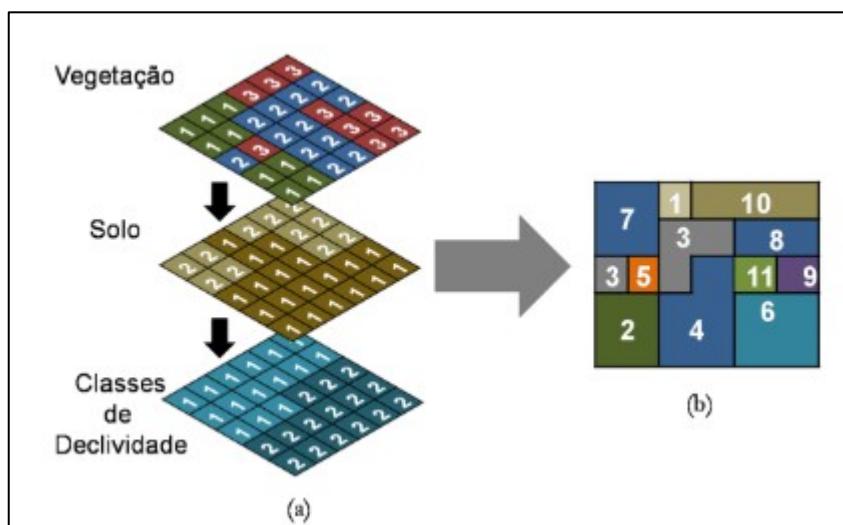
Considerando as definições feitas nos itens anteriores, o SWAT pode ser definido como um modelo conceitual, determinístico, semidistribuído e contínuo. Isso significa que é um modelo que considera as propriedades físicas, não depende da aleatoriedade dos cálculos, gera informações para a diversas partes da bacia ou para um ponto específico, e por fim necessita de série histórias para gerar resultados.

A utilização do SWAT tem crescido em diversos países. Sua aplicação é mais facilmente escolhida por se tratar de um modelo gratuito que possui uma extensa documentação no próprio site (<http://swatmodel.tamu.edu>), de manuais, publicações, artigos e documentos orientativos. No que diz respeito às interfaces, o SWAT pode ser configurado em diferentes extensões, como por exemplo ArcGIS, QGIS dentre outros (Oliveira, 2014).

Para simular uma bacia hidrográfica, essa é dividida em um número de sub-bacias homogêneas que possuem propriedades únicas de tipo, uso e declividade do solo, chamadas de HRUs (Unidades de Resposta Hidrológica). Cada HRU possui em suas informações de entrada agrupamentos em categorias, sejam elas: climáticas, de áreas com mesmo tipo de solo, usos, manejos e gestão dentro da sub-bacia, águas subterrâneas, e do canal principal ou córrego que drena a bacia (BRESSIANI, 2015).

Para ilustrar a definição de uma HRU, Silva (2013) a partir da Figura 8, sugere que sejam considerados três mapas com 30 células (5x6). Capa mapa apresenta um parâmetro, como tipos de cobertura vegetal, tipos de solo e classes de declividade. A partir disso os mapas são sobrepostos de tal forma que cada célula que apresente a mesma combinação de vegetação, solo e declividade sejam identificadas representando uma unidade de resposta hidrológica (HRU).

Figura 8 - Ilustração das HRUs no SWAT



Fonte: Silva, (2013).

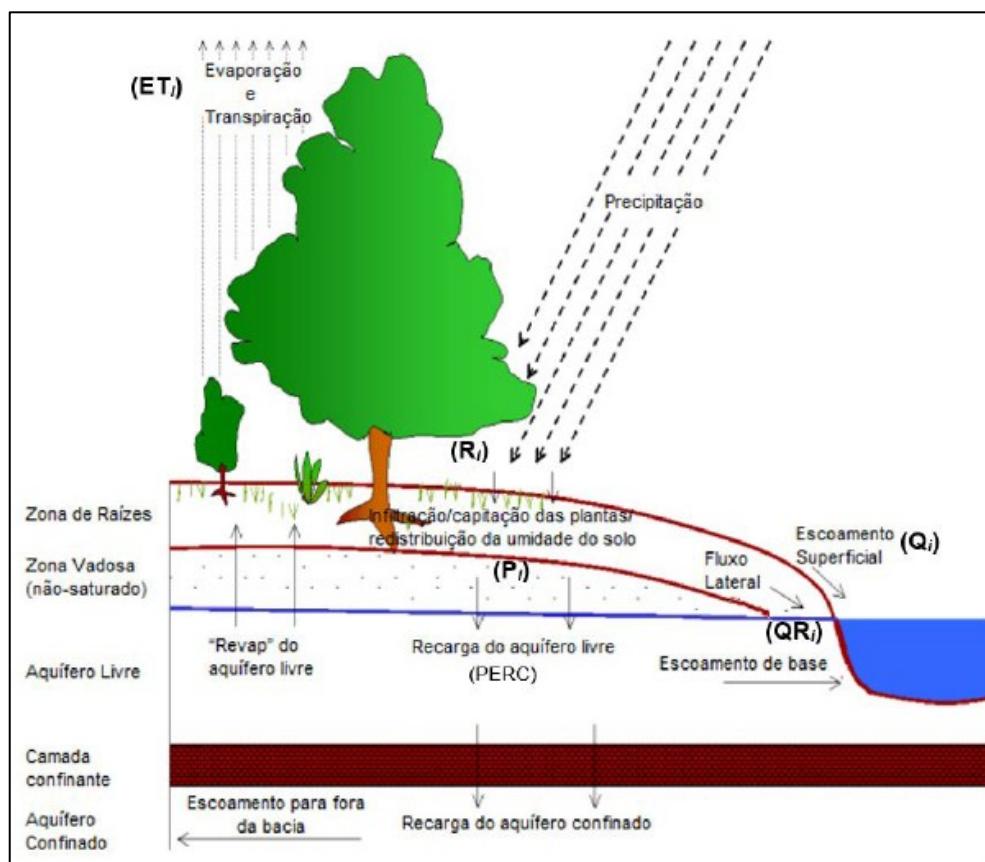
Nota-se que, com essa determinação o número de células reduziu de 30 para 11 células sem desconsiderar as informações dos três mapas. O objetivo de se separar as HRUs é o de reduzir o que se chama de “custo computacional” sem que o modelo perca a variabilidade espacial e características físicas.

O SWAT possui como componentes: o clima, a hidrologia, a temperatura do solo, o crescimento da planta, erosão e sedimentos, nutrientes, pesticida e uso e manejo do solo. Utilizando esses componentes as simulações incluem estudos de escoamento superficial, fluxo de retorno, evapotranspiração, percolação, crescimento de culturas e irrigação, fluxo de águas subterrâneas, carregamento de nutrientes e pesticidas (ARNOLD et al, 1998). O presente trabalho focará no componente hidrológico do modelo.

2.3.3 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado no balanço hídrico que está ilustrada de forma mais completa na Figura 9 e demonstrada de forma simplificada na Equação 1 (NEITSCH et al., 2011):

Figura 9 - Esquema representativo do ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de NEITSCH et al., (2011).

$$SW_t - SW_0 = \sum_{i=1}^t (PREC_i - SURQ_i - ET_i - PERCO_i - BF_i) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

SW_t = Conteúdo final de água no solo (mm).

SW_0 = Conteúdo inicial de água no solo disponível para absorção das plantas
(conteúdo inicial de água no solo – conteúdo de água no ponto de murcha permanente) (mm).

t = tempo (dias).

$PREC$ = Total diário precipitado (mm).

$SURQ_i$ = Total diário de escoamento superficial (mm).

ET_i = Total diário evapotranspirado (mm).

$PERCO_i$ = Total diário percolado (mm).

BF_i = Total diário de fluxo de base (mm).

Na modelagem do SWAT o escoamento superficial é baseado no método do número de curva do SCS (Serviço de Conservação do Solo), em que se considera a quantidade de escoamento superficial gerada por uma precipitação a depender principalmente das características da área, como tipo de solo, uso da terra, cobertura vegetal, inclinação do terreno e armazenamento inicial de água no solo (MIGUEL, 2016).

A evapotranspiração é baseada no método de Penman-Monteith. O método trata-se de uma abordagem para calcular a ET0 (evapotranspiração de referência), definida como a quantidade de água que uma superfície vegetada, de altura uniforme e irrigada, irá evaporar e transpirar. O método Penman-Monteith leva em conta variáveis metodológicas e físicas, incluindo temperatura do ar, umidade, radiação solar, pressão atmosférica e velocidade do vento, sendo considerado um dos mais precisos e robustos para essa estimativa.

A propagação de vazão é realizada em duas etapas no modelo SWAT. A primeira dentro da sub-bacia, em que se consideram reservatórios lineares que mostram o escoamento superficial, fluxo lateral e escoamento de base. Depois, a vazão de saída desses reservatórios é direcionada para a rede de drenagem que se propagam até o exutório utilizando o método de Muskingum, utilizado nessa pesquisa, ou do coeficiente de armazenamento variável tratado por Neitsch et al. (2005). Na propagação da vazão são incluídas perdas por sedimentação, arrasto de sedimentos, degradação do canal, entre outros (SILVA, 2013).

2.3.4 Análise de sensibilidade, calibração e validação

A modelagem hidrológica realizada pelo SWAT requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada para o modelo, essa quantidade faz com que a parametrização e calibração do modelo seja um pouco dificultada. Entretanto, atualmente, existem diversos softwares desenvolvidos que executam a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, de forma menos

trabalhosa, como por exemplo os programas, *SWAT+ toolbox*, *SWAT-cup*, *SWAT run R*, *pySWAT+*, dentre outros existentes no mercado, sendo alguns desses de uso e gratuito e outros com licenças pagas.

De acordo com Oliveira (2014), o modelo SWAT foi desenvolvido com um extenso banco de dados de solos, topografia, tipo de cultura, manejo e dados climáticos dos Estados Unidos, sendo que em sua concepção foi criado para utilizar informações de fácil aquisição, dispensando muitas vezes a etapa de calibração. No entanto, para a aplicação do modelo em regiões com características diferentes das encontradas no país de origem do *software*, o processo de calibração se faz fundamental para que o modelo possa ser validado, visto que os primeiros resultados obtidos tendem a divergir muito das condições reais das regiões estudadas.

A utilização de uma simulação sem calibração pode comprometer e indicar sérias falhas no balanço hídrico de uma bacia (BONUMÁ et al., 2013). No caso de uma simulação de vazões por exemplo, observa-se que quando se utiliza os parâmetros *default* do modelo, os resultados obtidos superestimam as vazões observadas, demonstrando que os procedimentos de calibração manual e automática do modelo são fundamentais.

Uma ferramenta gratuita, desenvolvida por volta dos anos de 2019, e que tem demonstrado bons resultados nessa etapa, é o *software SWAT+ Toolbox* (*SWAT*, 2024). O programa consiste em uma ferramenta gratuita criada pela equipe de programação do modelo SWAT, que permite a realização de análises de sensibilidade e calibração de modelos, principalmente.

A análise de sensibilidade consiste em uma metodologia utilizada para identificar os parâmetros que possuem maior e menor impacto dentro de uma simulação, e também como a alteração dos valores desses parâmetros podem afetar os resultados obtidos no modelo. Ao se fazer uma análise de sensibilidade observa-se quais são os parâmetros que mais influenciam no modelo e que devem ser trabalhados na etapa de calibração. Por outro lado, demonstra, por meio da identificação dos parâmetros que menos alteram a saída o modelo, aqueles que podem ser retirados da calibração (SALLES, 2012).

O processo de calibração dos modelos hidrológicos inicia-se após a etapa de análise de sensibilidade dos parâmetros, em que são desconsiderados os parâmetros menos influentes, e

os parâmetros mais influentes são ajustados de forma a observar a variação na qualidade da simulação do modelo. O processo de calibração objetiva minimizar os erros do modelo, diminuindo de forma iterativa os erros entre os dados observados e os dados estatísticos, muitas vezes envolvendo várias rodadas de ajustes e simulações (SALLES, 2012).

Essa etapa do processo pode ser realizada de forma manual ou automática, quando feita manualmente os parâmetros vão sendo alterados de forma manual e verifica-se a resposta da simulação às mudanças. Esse tipo de calibração requer conhecimento aprofundado sobre o modelo e é considerada bastante trabalhosa, visto que para um único parâmetro são necessárias diversas iterações até que se alcance o melhor resultado (SARMENTO, 2010).

Quando realizada de forma automática, os parâmetros influentes obtidos pela análise de sensibilidade vão sendo alterados por meio de algoritmos e técnicas de otimização e análise de incertezas. Essa forma de calibração consegue lidar com muitos parâmetros ao mesmo tempo, fazendo com que a qualidade da simulação do modelo melhore de forma significativa.

A qualidade dos modelos de simulação pode ser verificada por meio de diversas metodologias. Nesse trabalho serão utilizados dois índices, o Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), (Nash e Sutcliffe, 1970) e Percent Bias (PBIAS), (Moriasi et al., 2007), amplamente utilizados na verificação da aderência entre os dados simulados e observados.

O índice Nash-Sutcliffe Efficiency (NSI) é utilizado para medir a eficiência de um modelo, os seus valores podem variar de menos infinito e um, sendo um o valor ideal. Valores negativos indicam que os valores observados expressam uma melhor estimativa que os simulados. A Equação 2 demonstra o cálculo que deve ser feito para calcular o índice (Nash e Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{med,obs})^2} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

$Q_{obs,i}$ = Valor observado no tempo i;

$Q_{sim,i}$ = Valor simulado no tempo i;

$Q_{med, obs}$ = Média dos valores observados;

N = Número de eventos;

Já o Percente Bias (PBIAS), mede o viés médio da simulação, indicando principalmente a tendência de superestimar ou subestimar os valores observados. Nesse caso os valores mais próximos de zero indicam um melhor desempenho, valores menores que zero indicam uma subestimativa do modelo e os maiores que zero uma superestimativa do modelo. A Equação 3 demonstra como esse índice é calculado.

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$Q_{obs,i}$ = Valor observado no tempo i;

$Q_{sim,i}$ = Valor simulado no tempo i;

N = Número de eventos;

A interpretação dos índices feita por Moriasi et al., (2015), realiza uma diferenciação entre a avaliação dos parâmetros de acordo com o *output* que se deseja avaliar. A Tabela 1 mostra os intervalos para os critérios de avaliação de desempenho, de acordo com cada índice, R², NSE e PBIAS (%), e com o *output* requerido. No caso da tabela considerou-se saídas de vazão e de sedimentos, por exemplo.

Tabela 1- Critérios finais de avaliação de desempenho para as medidas estatísticas de desempenho recomendadas para modelos em escala de bacia hidrográfica e de campo.

Measure	Output Response	Temporal Scale ^[a]	Performance Evaluation Criteria			
			Very Good	Good	Satisfactory	Not Satisfactory
Watershed scale						
R ²	Flow ^[b]	D-M-A	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.60 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.60
	Sediment/P ^[c]	M	R ² > 0.80	0.65 < R ² ≤ 0.80	0.40 < R ² ≤ 0.65	R ² ≤ 0.40
	N	M	R ² > 0.70	0.60 < R ² ≤ 0.70	0.30 < R ² ≤ 0.60	R ² ≤ 0.30
NSE	Flow	D-M-A	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	Sediment	M	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.45 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.45
	N/P ^[c]	M	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
PBIAS (%)	Flow	D-M-A	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	PBIAS ≥ ±15
	Sediment	D-M-A	PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	PBIAS ≥ ±20
	N/P ^[c]	D-M-A	PBIAS < ±15	±15 ≤ PBIAS < ±20	±20 ≤ PBIAS < ±30	PBIAS ≥ ±30
Field scale						
R ²	Flow	M	R ² > 0.85	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.70 < R ² ≤ 0.75	R ² ≤ 0.70
	d	M	d > 0.90	0.85 < d ≤ 0.90	0.75 < d ≤ 0.85	d ≤ 0.75
<small>[a] D, M, and A denote daily, monthly, and annual temporal scales, respectively.</small>						
<small>[b] Includes stream flow, surface runoff, base flow, and tile flow, as appropriate, for watershed- and field-scale models.</small>						
<small>[c] Where there were no differences, PEC were grouped for the output responses.</small>						

Fonte: Moriasi et al., (2015).

Por fim, a etapa de validação dos resultados é o passo final feito para verificar a eficiência do modelo estudado para situações semelhantes às situações calibradas. Para isso, utiliza-se o mesmo conjunto de parâmetros já calibrados e compara-se com os dados obtidos não utilizados na calibração (OLIVEIRA, 2014). O procedimento de validação muito se assemelha à etapa de calibração, em que as simulações feitas são comparadas com os valores observados para verificar se a função objetivo foi satisfeita. Bons resultados nessa etapa indicam que o modelo pode ser extrapolado para estudo de mudanças de condições e cenários (BONUMÁ, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O conceito da multidisciplinaridade está presente nesse trabalho por desenvolver o objeto usando várias áreas do conhecimento. A metodologia consiste na utilização de estudos de hidrologia no desenvolvimento das modelagens hidrológicas das bacias, nas aplicações de geoprocessamento para gerar mapas que melhor possibilitem a interpretação dos dados e informações, tratando de assuntos de segurança hídrica e gestão dos recursos hídricos.

A modelagem hidrológica será realizada por meio do modelo SWAT+ e do QGIS que possibilitarão a realização de simulações para o estudo quantitativo aprofundado da disponibilidade hídrica das sub-bacias. Essa modelagem é importante na medida em que pode ser utilizada para prever situações futuras de segurança hídrica, e ainda auxiliar nas tomadas de decisões pelos órgãos gestores da bacia e da alocação de recursos hídricos. A Figura 10 demonstra o fluxograma metodológico no qual esse trabalho será desenvolvido.

Figura 10 - Fluxograma metodológico

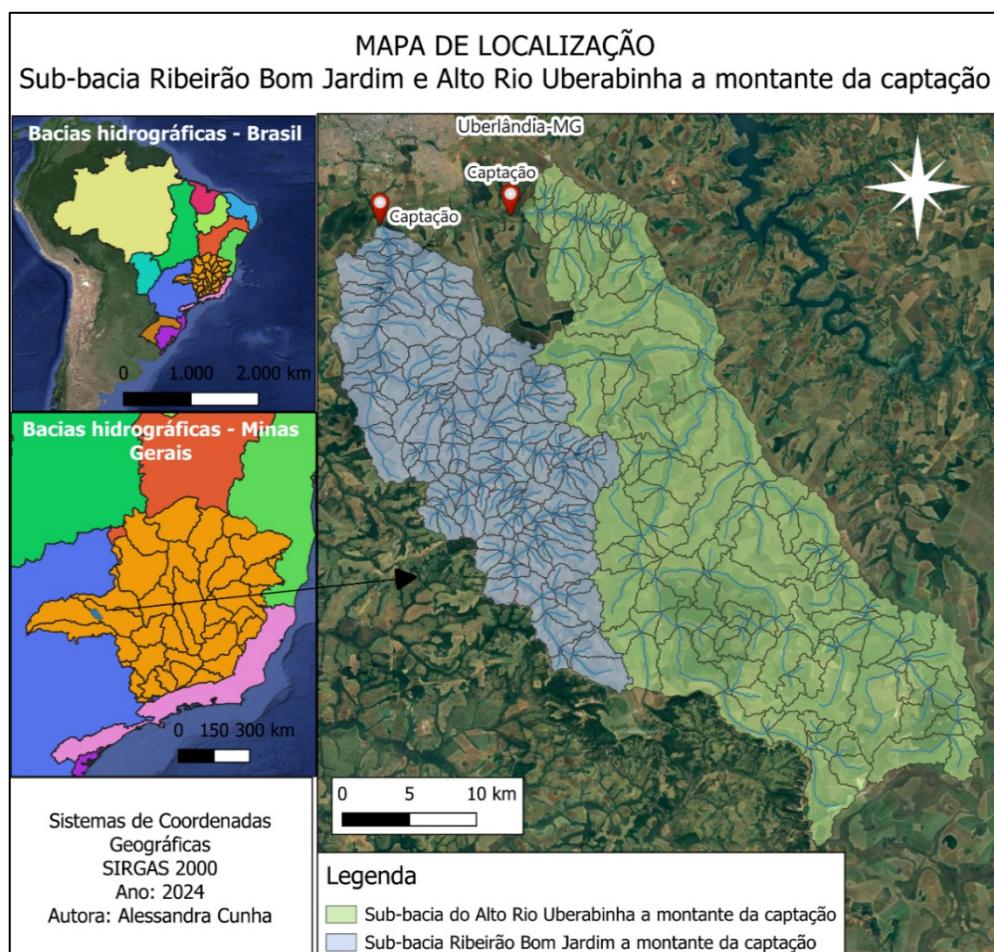


Fonte: Autora, 2024.

3.1 ÁREA DE ESTUDO DAS SUB-BACIAS MODELADAS

A área de estudo consiste em duas sub-bacias localizadas em áreas a montante de dois importantes reservatórios para a cidade de Uberlândia-MG, o Reservatório Sucupira e o Reservatório Bom Jardim. Esses mananciais estão na Bacia Federal do Paranaíba e na Bacia Estadual do Alto Rio Uberabinha. Nesse estudo as bacias receberam a denominação de sub-bacia do Alto Rio Uberabinha (ARU) e sub-bacia do Ribeirão Bom Jardim (RBJ), e estão locados respectivamente nas coordenadas 804153,83E, 201023,70E, 7848126,06S e 7902107,11S (ARU); 783002,95E, 804473,28E 7897703,00 S 7860172,92S (RBJ), possuindo áreas de 777,50 km² e 435,45 km². Essas duas sub-bacias estaduais são responsáveis pela maior parte do abastecimento de água potável da cidade. A Figura 11 mostra o mapa de localização dessas áreas.

Figura 11 - Mapa de localização sub-bacias ARU e RBJ



Fonte: Autora, (2024).

As duas sub-bacias objeto desse estudo fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, localizada na porção oeste do estado de Minas Gerais, na região do Triângulo Mineiro. A bacia possui área total de 2.188 km² e está inserida parcialmente nos municípios de Uberaba, Uberlândia e Tupaciguara. O Rio Uberabinha possui extensão próxima de 150 km e nasce na porção norte do município de Uberaba e deságua na margem esquerda do Rio Araguari (BORGES, 2012).

A cidade de Uberlândia está localizada na Mesorregião do Triângulo Mineiro / Alto Paranaíba, e seu crescimento tem se mostrado acima da média estadual. De acordo com os dados do IBGE (2023), Uberlândia possui população de 713.224 habitantes, sendo apontada como a 28^a maior cidade do país e a 2^a maior do estado de Minas Gerais. Considerando os dados do Censo 2022, a cidade apresentou o maior crescimento habitacional no estado de Minas Gerais. Nos últimos 12 anos apresentou crescimento de mais de 109 mil pessoas, obtendo-se um aumento populacional de 18,08% em comparação com o Censo de 2010.

Segundo os dados disponibilizados pelo DMAE, no site da Prefeitura de Uberlândia (2024), o reservatório Bom Jardim cuja Estação de Tratamento de Água (ETA) recebe o nome de ETA Bom Jardim é responsável pelo abastecimento de algumas regiões como zona sul, leste, oeste e setor central da cidade, fornecendo uma vazão média de 1600 litros por segundo. Já o reservatório Sucupira, que atende à ETA Sucupira é responsável pelo abastecimento de outra parte da cidade de Uberlândia, fornecendo a vazão média de 1400 litros por segundo.

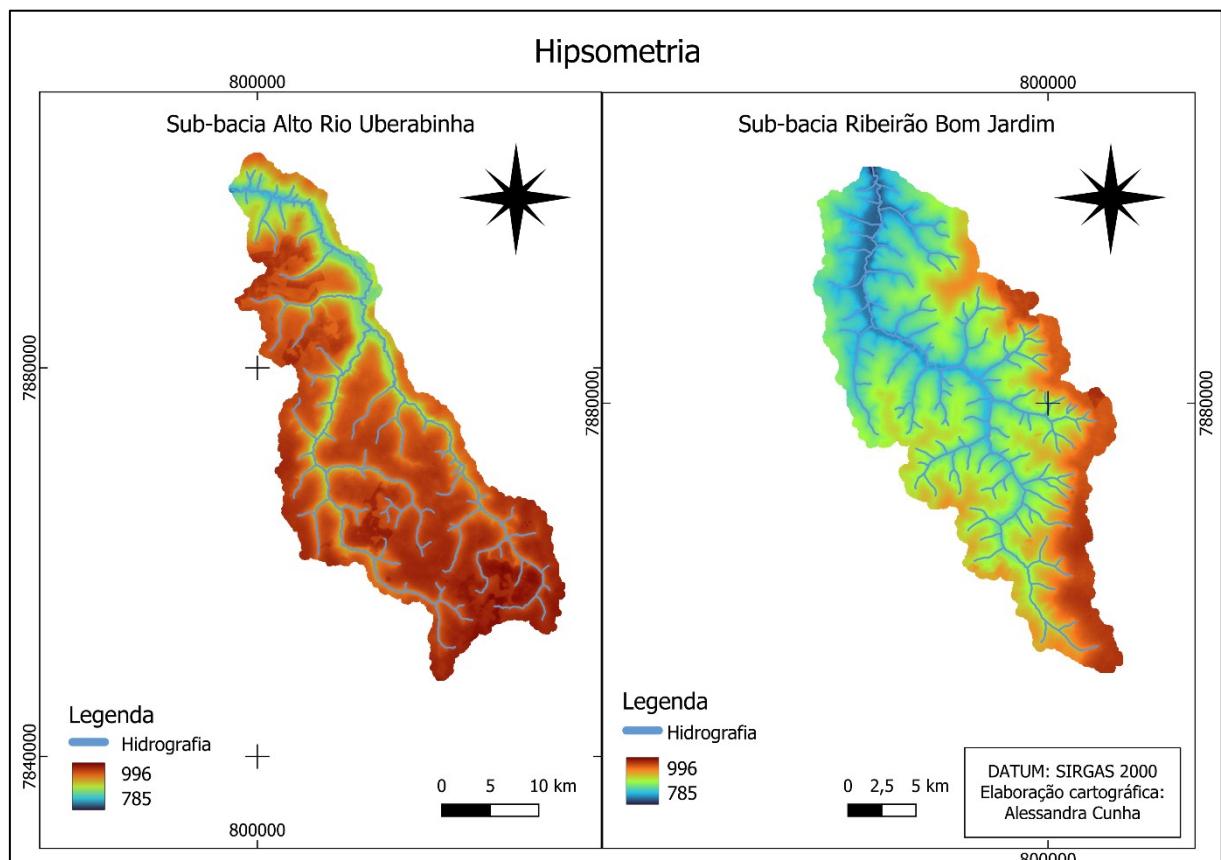
A seguir são apresentados os principais parâmetros que nortearam as simulações dessa pesquisa e para ilustrar será utilizado SIG na apresentação dos mapas contendo as informações pertinentes. Nos próximos tópicos serão apresentados a altimetria da região dessas sub-bacias, a declividade dos solos, o estudo de solos (pedologia), uso e ocupação da terra, zonas climáticas, índices pluviométricos, dentre outros. Nos mapas apresentados foram utilizados a projeção Transversa de Mercator (UTM), zona 22S e o Datum SIRGAS 2000 (31982).

3.1.1 Hipsometria e declividade

As sub-bacias apresentam amplitude altimétrica de 211 metros, com cotas variando entre 785 e 996 metros. Ao realizar uma comparação entre as duas áreas, observa-se que a sub-bacia do

Alto Rio Uberabinha apresenta maiores valores de altitude que a porção do Ribeirão Bom Jardim. Os mapas da Figura 12 ilustram esse parâmetro.

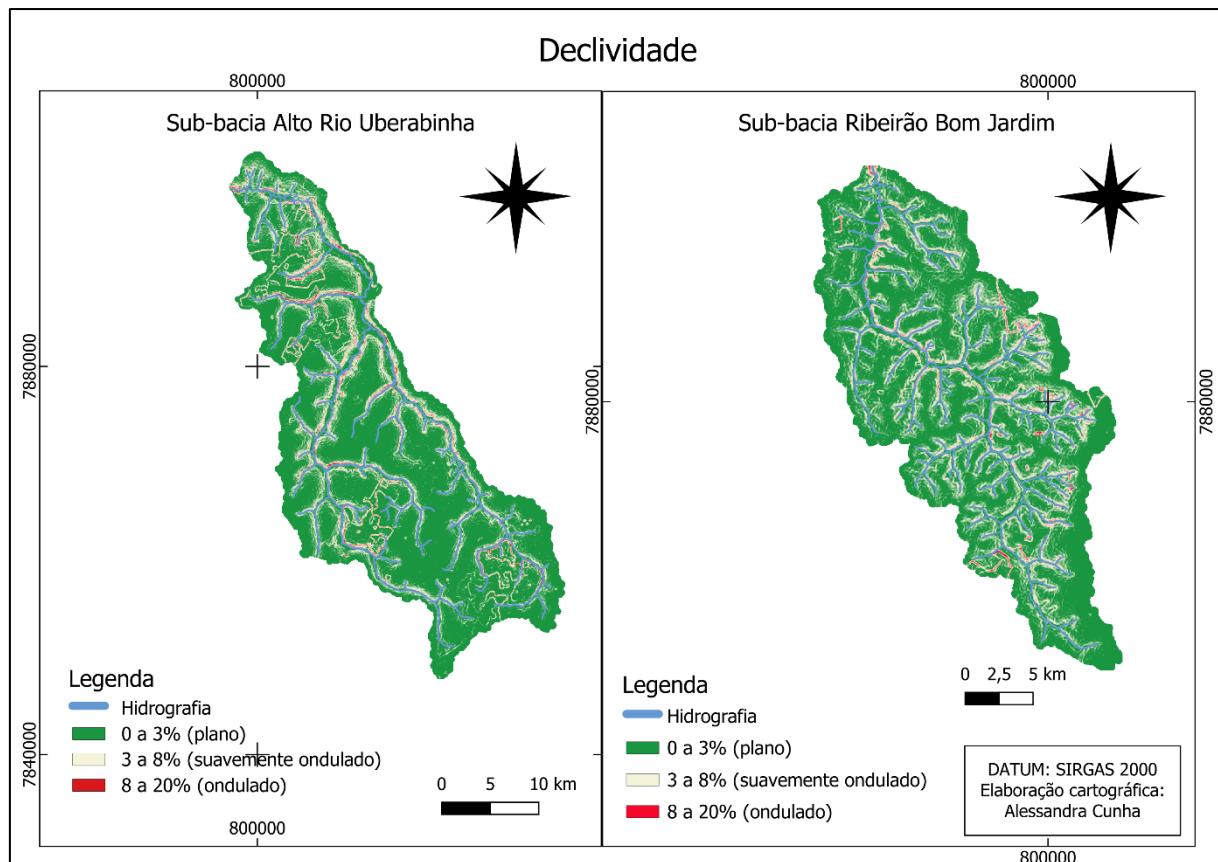
Figura 12 - Mapa hipsométrico das sub-bacias



Fonte: Autora, (2024).

No que diz respeito à declividade dos solos, as sub-bacias apresentam solos predominantemente planos, suave ondulados e ondulados de acordo com a classificação da EMBRAPA. Essa classificação pode ser observada nos mapas da Figura 13.

Figura 13 - Mapas de declividades das sub-bacias



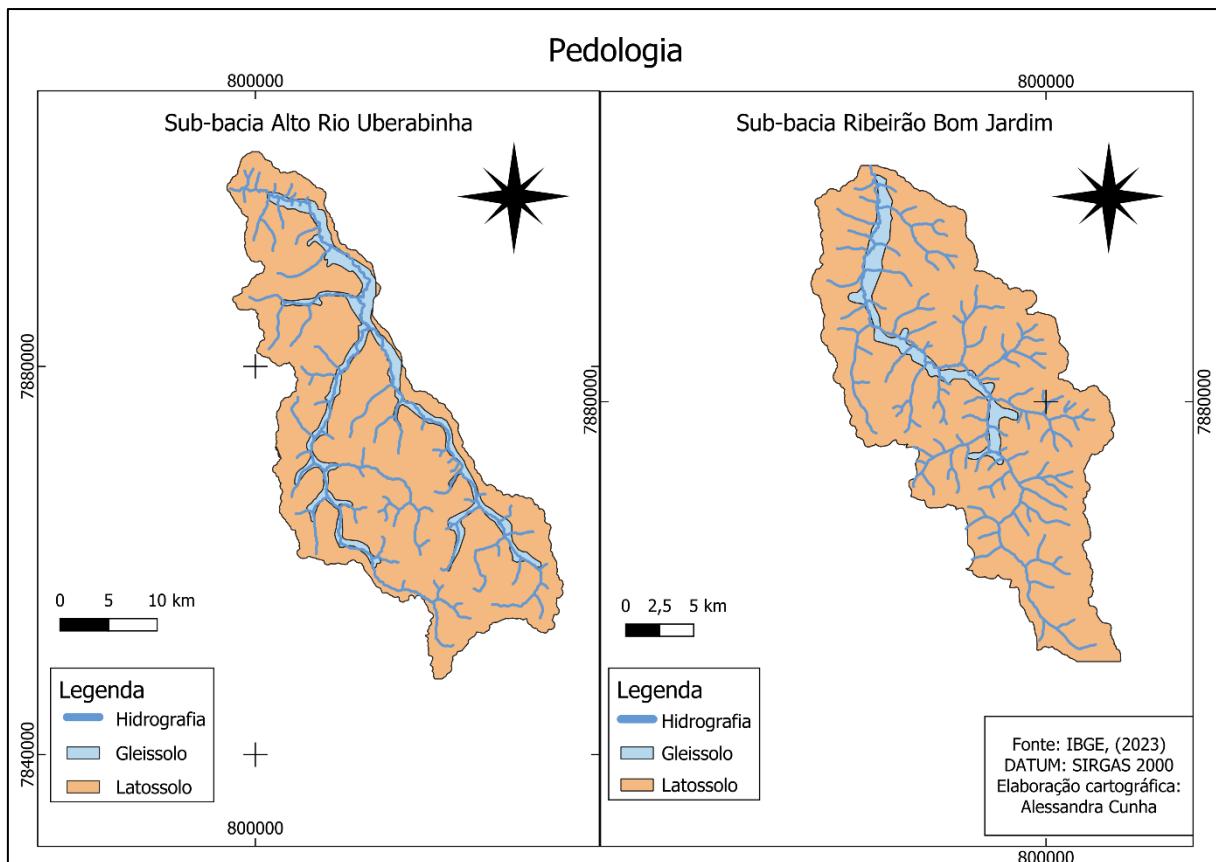
Fonte: Autora, (2024).

De modo geral, o Município de Uberlândia situa-se no domínio de Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná. Sua região caracteriza-se por possuir relevos levemente ondulados com altitudes inferiores a 1000 m. A vegetação predominante da cidade é o cerrado e suas variações como veredas, campos sujos ou cerradinhos, campos limpos, cerradões, matas várzeas, matas de galeria ou ciliares e matas mesoféticas (DMAE, 2019).

3.1.2 Pedologia

O mapa de solos utilizado para classificação nas áreas do estudo foi coletado no site do IBGE (2024), a partir de um arquivo em *shapefile*. Utilizando essa classificação dos solos, foi utilizado o *software* QGIS na elaboração do mapa pedológico para a região de estudo. A Figura 14 apresenta os tipos de solos obtidos nessa região de acordo com cada sub-bacia. As legendas foram elaboradas de acordo com a classificação do IBGE (2007).

Figura 14 – Mapa pedológico das sub-bacias



Fonte: Autora, (2024).

Pelo mapa é possível observar que as sub-bacias são formadas principalmente por latossolos, sendo mais especificamente definidos nessa região como latossolos vermelhos e latossolos vermelho-amarelos, tendo incidência em áreas próximas aos cursos de água principais de solos do tipo gleissolo.

De acordo com a Embrapa (2021), os latossolos vermelhos apresentam esse nome devido ao elevado teor de óxido de ferro presente em seu material de origem em ambientes drenados. Sua ocorrência é comum nas regiões sudeste e centro-oeste do país e são responsáveis por grande parte da produção agrícola do país, principalmente por se apresentarem em locais planos ou suave ondulados. Além disso, são considerados solos profundos e porosos, característica importante para o bom desenvolvimento radicular das culturas.

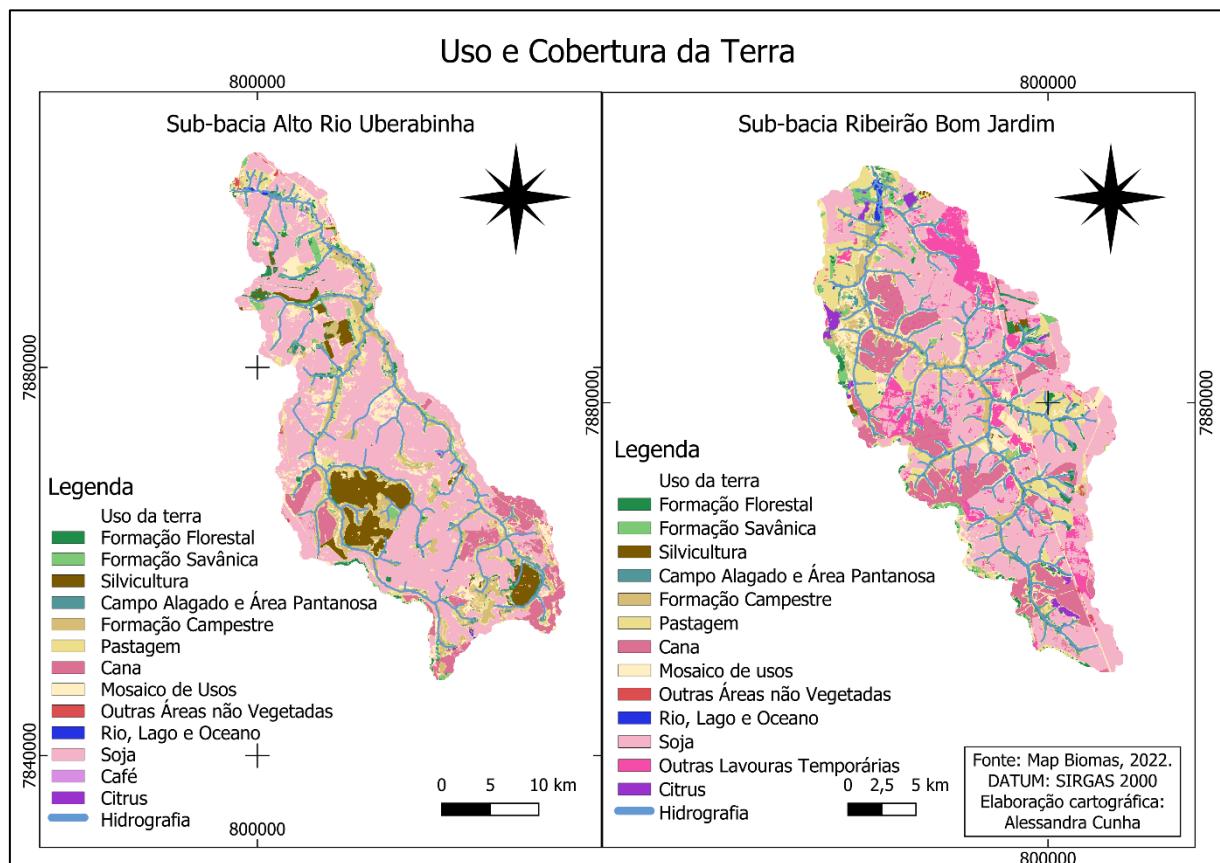
Ainda de acordo com a Embrapa (2021), os latossolos vermelho-amarelos são identificados em extensas áreas do Brasil, também são associados aos relevos plano, suave ou suave ondulado e

também ocorrem em ambientes bem drenados sendo muito utilizados para a agropecuária. Já os gleissolos estão associados aos locais mais baixos das planícies aluviais, estando periodicamente saturados por água. São solos que ocorrem sob vegetação hidrófila, arbustiva ou arbórea e apresenta baixa fertilidade natural.

3.1.3 Uso e cobertura da terra

Os dados e informações sobre o uso e cobertura da terra foram coletados no site do *Map Biomas* (2022), que fornece um arquivo raster em que os diferentes usos da terra são classificados (Figura 15). A legenda para cada uso foi feita utilizando a classificação do *Map Biomas Brasil*.

Figura 15 - Uso e ocupação da terra das sub-bacias



Fonte: Autora, (2024).

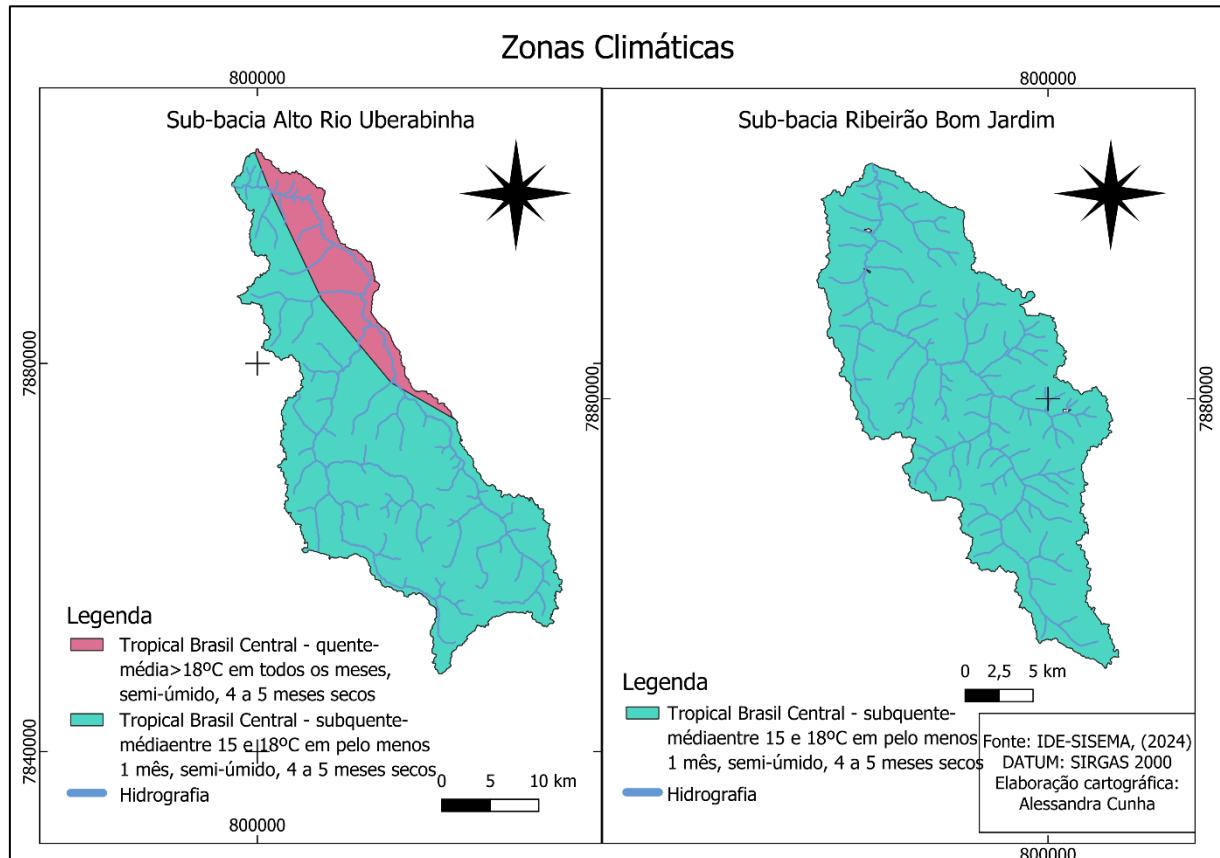
No mapa é possível observar que o principal uso do solo nas bacias está relacionado às áreas agrícolas, seguido de algumas ocupações em áreas campestres e de silvicultura. Existem

pequenas áreas de ocupações em áreas florestais e vegetação florestal nas bordas, mas que são dificilmente visualizadas nesse mapa.

3.1.4 Zonas climáticas

Em relação ao clima, as sub-bacias estão sob influência de duas zonas climáticas, sendo a ARU dentro da zona Tropical Brasil Central, quente, com temperaturas médias acima de 18°C por todos os meses, semi-úmido, e com 4 a 5 meses secos no ano, e ambas sub-bacias influenciadas pela zona Tropical Brasil Central, subquente, com temperaturas médias variando entre 15 a 18°C em pelo menos um mês do ano, semi-úmido e com 4 a 5 meses secos. Em resumo, o clima nesses locais é caracterizado por duas estações bem definidas, sendo o verão marcado por temperaturas elevadas e chuvas intensas e o inverno por temperaturas amenas e baixos ou inexistentes índices pluviométricos. A Figura 16 ilustra a divisão de cada uma dessas zonas climáticas tratadas.

Figura 16 - Zonas climáticas da sub-bacias



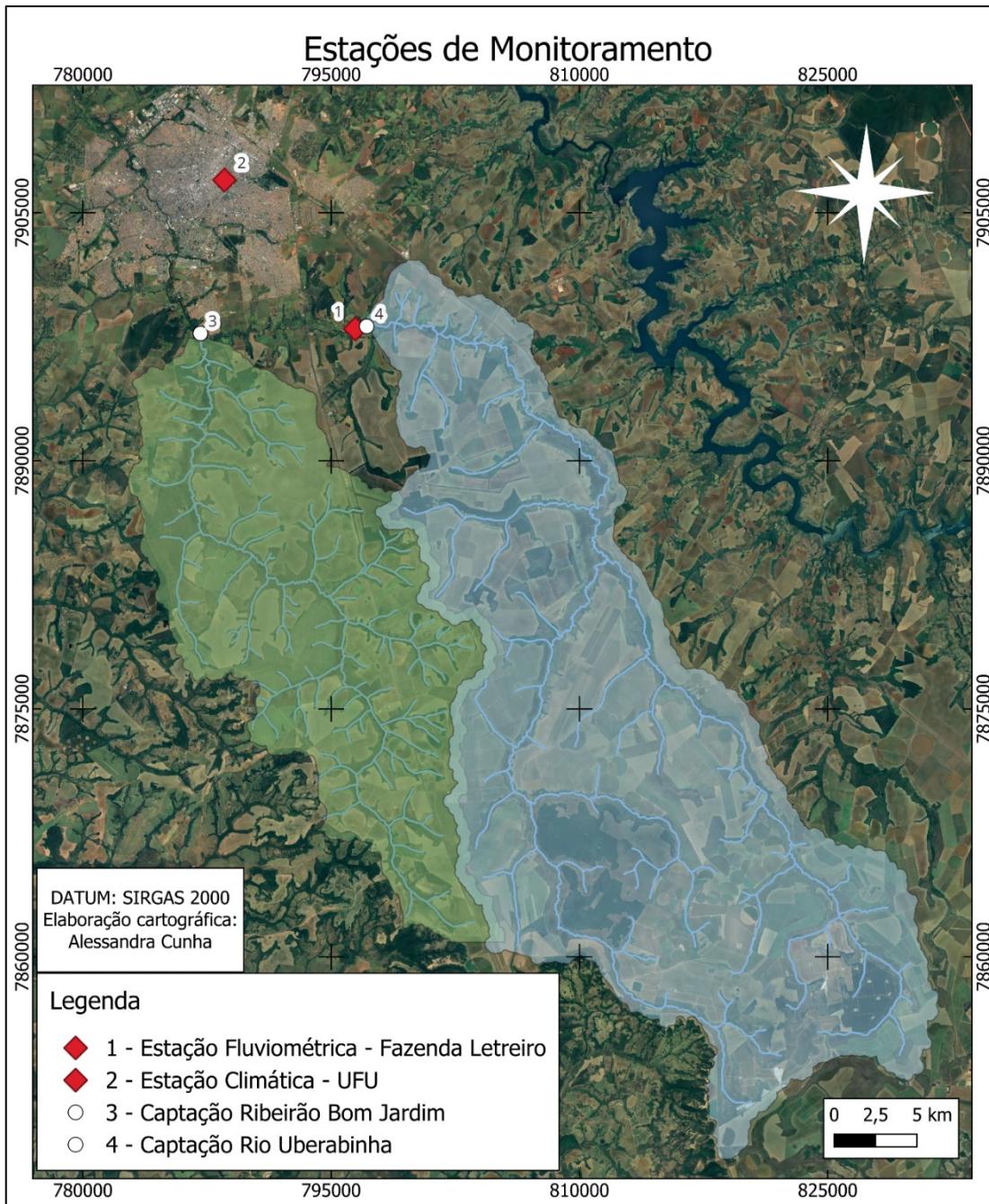
Fonte: Autora, (2024).

3.2 DADOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

Para as sub-bacias em estudo, o monitoramento dos dados climáticos e hidrológicos foi feito por meio de duas estações, sendo a primeira a Estação Fluviométrica Fazenda Letreiro, que possui o código 60381000 no banco de dados da ANA e a segunda, a Estação Climática da UFU, localizada dentro do campus Santa Mônica na Universidade Federal de Uberlândia, estando sob o código A507 no banco de dados do INMET. A primeira estação foi responsável pelo fornecimento dos dados fluviométricos, nesse caso foram coletados os dados de vazão diários da Fazenda Letreiro para utilizar na calibração das vazões simuladas para a sub-bacia aru e para a regionalização de vazões na sub-bacia RBJ. Enquanto que a segunda estação foi responsável pelo fornecimento dos dados mensais de precipitação (mm), as máximas diárias de pressão atmosférica (mb), radiação solar, temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$) e velocidades do vento médias e máximas (m/s).

Em relação à localização das estações consideradas, a primeira está localizada entre as duas sub-bacias, em uma distância média de 10 quilômetros e a segunda está localizada no interior da cidade de Uberlândia. No que tange a coleta de dados, os registros das vazões fluviométricas, precipitações, pressão atmosférica, temperatura média e velocidades do vento médias abrangeram um período de janeiro de 2007 a dezembro de 2023. O mapa da Figura 17 ilustra a localização dessas áreas.

Figura 17 - Estações de monitoramento consideradas na simulação



Fonte: Autora, (2024)

3.2.1 Regionalização de vazões para sub-bacia RBJ

Considerando a Figura 18, é possível observar que a Estação Fluviométrica – Fazenda Letreiro está localizada próximo a captação da bacia do ARU e localizada no Rio Uberabinha, entretanto no caso da sub-bacia RBJ, não existe nenhuma estação fluviométrica nas proximidades desse

rio. A ausência de estação de monitoramento na sub-bacia faz com que seja necessário realizar uma regionalização de vazões utilizando as características da sub-bacia ARU.

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada na estimativa de vazões em locais em que não há medições diretas, sendo baseada nos dados disponíveis (medidos) de uma bacia com características semelhantes e próximas. Existem diversas maneiras de se regionalizar as vazões de uma bacia, nesse trabalho será utilizada uma abordagem que considera a vazão específica média mensal e a proporcionalidade das áreas. A possibilidade de aplicação desse tipo de abordagem é possível nesse trabalho, devido à proximidade e a homogeneidades das características hidrológicas (relevo, uso da terra, solo, clima) das sub-bacias.

Para o cálculo da vazão específica utiliza-se a Equação 4, conforme apresentado.

$$q = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

q – vazão específica dada em (l/s x km²);

Q – vazão medida na bacia de referência (l/s);

A – área da bacia de estudo (km²).

Após calcular as vazões específicas médias mensais para as sub-bacias, os valores são multiplicados pela área da bacia em que se busca saber a vazão. Os valores obtidos serão utilizados na calibração e validação dos resultados obtidos no SWAT +.

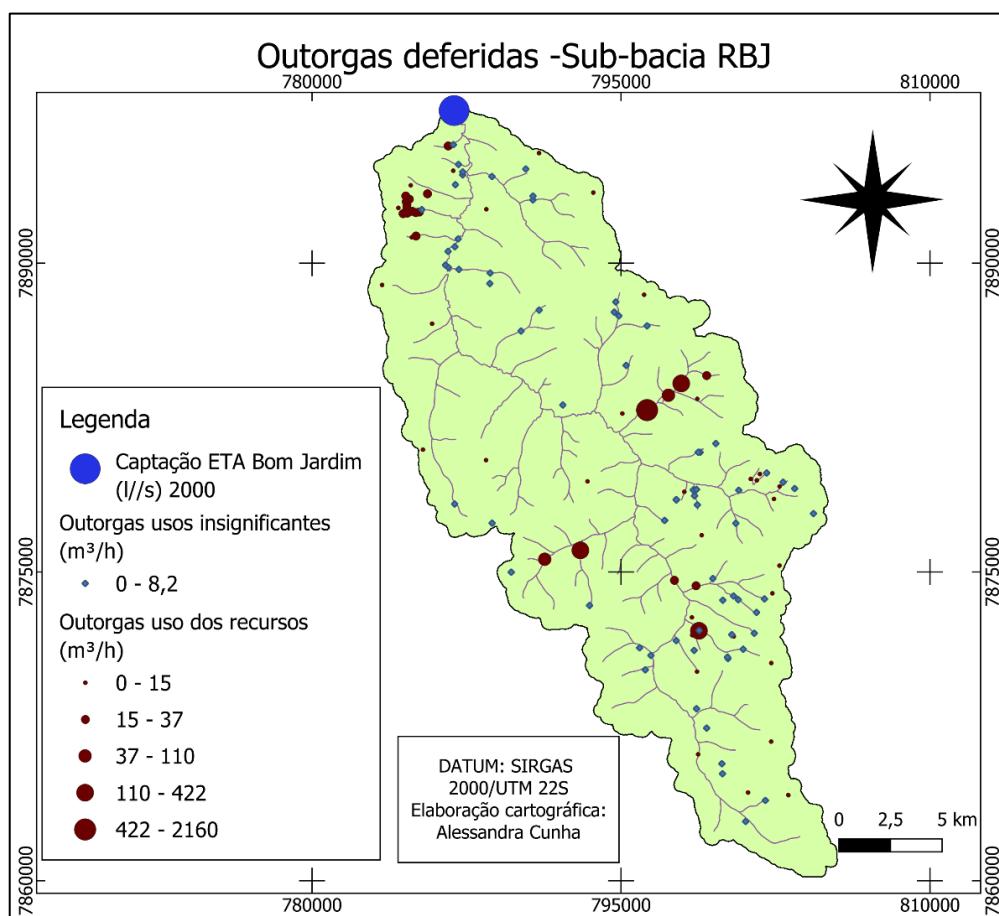
3.3 OUTORGAS EXISTENTES

A outorga consiste em um instrumento legal, por meio do qual o assegura-se o direito do outorgado em utilizar os recursos hídricos de acordo com a quantidade autorizada. Entretanto, de acordo com o IGAM (2024), essa autorização não se trata de uma propriedade da água, e sim do direito de uso, podendo ser suspensa em casos de escassez hídrica, do não cumprimento dos termos da outorga e de outras hipóteses previstas em legislação.

Para melhor compreensão da demanda hídrica para as sub-bacias RBJ e ARU, foram levantadas as outorgas deferidas para essas áreas, superficiais e subterrâneas, de usos insignificantes ou não. Com essas informações, foram elaborados mapas com a localização dessas outorgas e com as faixas de vazões variando de acordo com o tamanho do ponto que demarca a localização dessas autorizações.

Para a sub-bacia do RBJ foram contabilizadas 63 outorgas deferidas para uso de recursos hídricos, chegando a $1,13 \text{ m}^3/\text{s}$, e mais 74 outorgas consideradas para usos insignificantes, totalizando $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$. Além dessas, verifica-se a outorga de uso de recursos para abastecimento público em nome do DMAE, que atualmente possui outorga de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para a ETA Bom Jardim. O mapa da Figura 18 ilustra essas outorgas.

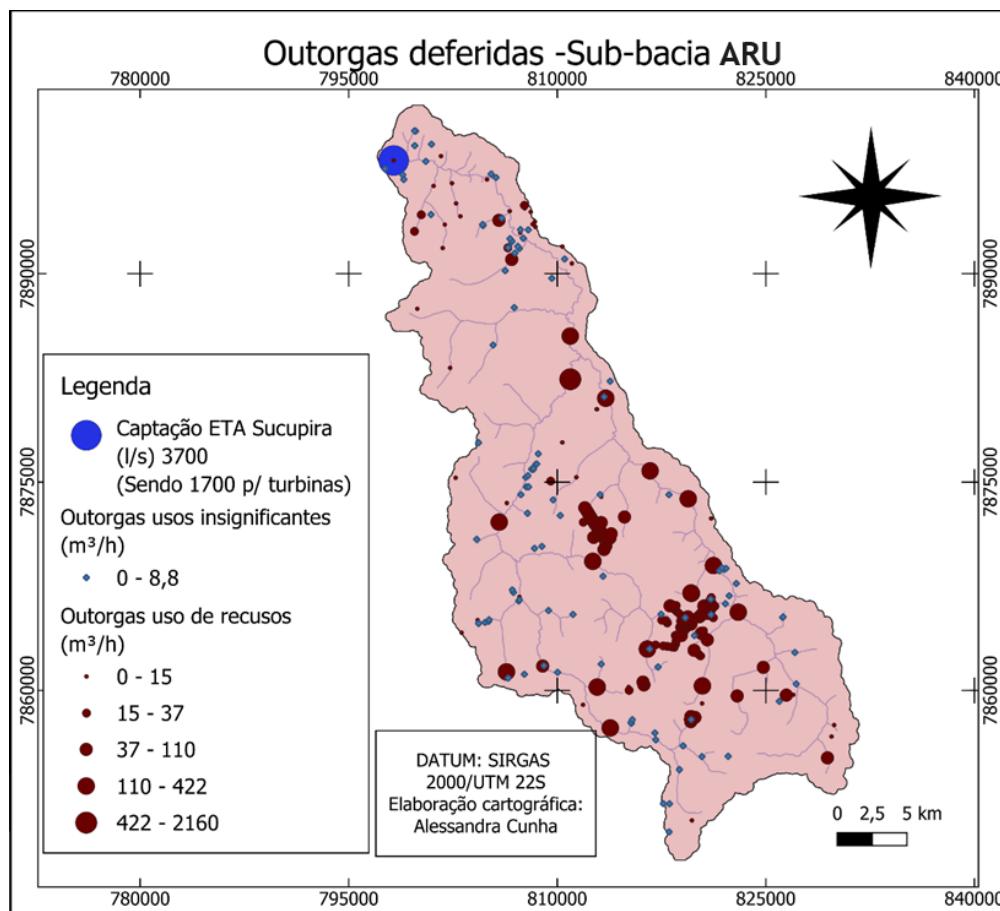
Figura 18 - Outorgas deferidas para a Sub-bacia do Ribeirão Bom Jardim



Fonte: Autora, (2024).

Para a sub-bacia ARU foram contabilizadas um total de 174 de outorgas de usos de recursos hídricos, com vazão total outorgada de $2,37 \text{ m}^3/\text{s}$ e mais 111 outorgas consideradas de usos insignificantes, com vazão total de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Ainda, verifica-se também a segunda outorga para abastecimento público de Uberlândia, com valor total outorgado de $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo destinados a usos consuntivos $2 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ destinados para operação das turbinas hidráulicas somente, sem utilização consuntiva. A Figura 19 ilustra o mapa com as demarcações e análises de vazão.

Figura 19 - Outorgas deferidas para a Sub-bacia do Alto Rio Uberabinha



Fonte: Autora, (2024).

Em resumo, na data presente em que foram levantados esses dados, obteve-se um valor total outorgado para a sub-bacia RBJ de $3,16 \text{ m}^3/\text{s}$ e de $4,43 \text{ m}^3/\text{s}$ para a sub-bacia ARU, desconsiderando a vazão de $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ para o funcionamento das turbinas da ETA Sucupira.

3.4 SOFTWARES UTILIZADOS

Para o desenvolvimento das simulações hidrológicas de vazões pelo modelo SWAT alguns sistemas computacionais e aplicativos foram utilizados. Dentre esses estão:

- QGIS na versão 3.34.8, *software* livre e de código aberto licenciado segundo a GNU (Licença Pública Geral). O uso do SIG nesse trabalho teve como função de gerar, integrar e manipular as informações necessárias para a simulação de vazões, utilizando mapas e tabelas com dados associados.
- A versão do modelo SWAT utilizada foi a QSWAT+ versão 2.5.3, uma interface que utiliza um *software* que une o QGIS ao modelo SWAT. O SWAT+ foi desenvolvido por cientistas do USDA-ARS (Agência de pesquisa científica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) e da Texas A&M.
- SWAT+ Toolbox, versão 3.0.0, uma ferramenta gratuita desenvolvida para facilitar a calibração, análise de sensibilidade, avaliação e validação do modelo SWAT+. Ele foi desenvolvido para auxiliar os usuários a ajustar parâmetros, analisar incertezas e validar simulações de projetos com o modelo SWAT+.
- Na tabulação dos dados obtidos em estações pluviométricas e fluviométricas e também na criação dos gráficos foi utilizado o Microsoft Excel, 2019.

3.5 DADOS DE ENTRADA NO MODELO SWAT

Como pode ser observado no item 3.1, as duas sub-bacias serão representadas e simuladas de forma separada, isso porque serão analisadas as duas captações. Apesar disso, ao final da simulação os resultados serão integrados e discutidos de forma conjunta.

Ainda antecedendo a etapa de inserção dos dados no SWAT, foi criado o banco de dados para cada sub-bacia RBJ e ARU. Em cada banco de dados foram levantadas as informações mapeadas para cada área, como: o modelo digital de elevação (MDE), os tipos de solo, o uso e ocupação do solo, os dados climáticos, dentre outros. Esses dados foram tratados e reprojetados para o sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), zona 22S, com Datum SIRGAS 2000, 31982, o que implicou na padronização para todos os mapas com essa mesma projeção.

A simulação se divide em quatro etapas no *software*, sendo elas: a delimitação das sub-bacias, a criação das HRUs, a configuração dos parâmetros com a execução do modelo e a visualização de resultados, ainda sem calibração, por meio de mapas, animações e gráficos. Além dessas etapas, na interface do programa é possível ajustar os parâmetros, exportar tabelas e criar relatórios a respeito das informações do projeto, como classificação das HRUs, parâmetros de solo e declividade. A Figura 20 ilustra essas etapas na interface inicial do programa.

Figura 20 – As 4 etapas da simulação no SWAT+



Fonte: SWAT, (2024).

3.5.1 Delimitação das bacias hidrográficas

A etapa de delimitação das bacias hidrográficas consiste na identificação das áreas que irão contribuir para o ponto de saída na rede de drenagem. O primeiro passo consiste em inserir o MDE da área de interesse, verificando se está no sistema de coordenadas adequado para a análise hidrológica. Para esse trabalho foram utilizadas 4 imagens do Topodata: 18S48ZN, 18S495ZN, 19S48ZN e 19S495ZN, com essas imagens criou-se o mosaico e delimitou-se a área de interesse que foi inserida ao programa.

Feito isso, incorpora-se ao MDE uma camada com a rede de drenagem existente, caso essa camada não seja inserida a rede de drenagem será simulada pelo próprio programa considerando o arquivo MDE. Carregou-se a camadas dos rios e ainda, no campo número de células a partir de teste optou-se por utilizar o valor de 1200 que foi o valor que melhor representou o nível de

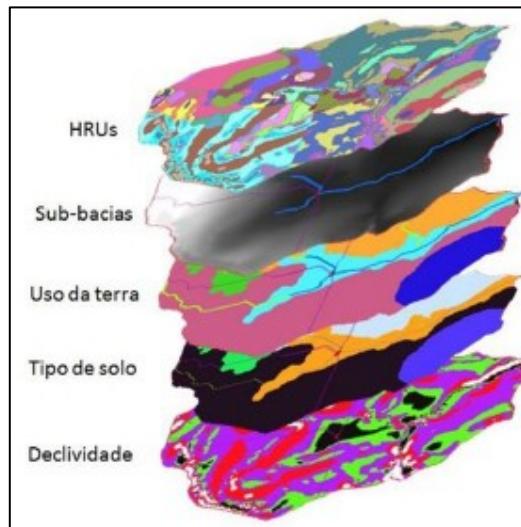
detalhamento para essa etapa. Quanto menor o valor maior será o detalhamento dos cursos de água a serem criados e consequentemente mais pesada será essa simulação.

Após a definição da drenagem são definidos os pontos de saída dessas redes, esses pontos correspondem aos locais de interesse para demarcar a bacias e as sub-bacias. O programa retorna com uma divisão de áreas que pode ser editada unindo as sub-bacias menores, por exemplo. Por fim, ainda nessa etapa é feita a demarcação dos reservatórios que existem dentro da área.

3.5.2 Definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs)

Após a conclusão da primeira etapa, entramos na segunda parte da simulação que consiste na definição das HRUs que são obtidas pela inserção e combinação das sub-bacias com os mapas de tipos de solo, manejo da terra e de declividade. A Figura 21 mostra um exemplo de formação das HRUs.

Figura 21 - Exemplo de formação das HRUs



Fonte: Fukunaga, (2012).

Os mapas de uso da terra dessas bacias foram obtidos pelo Mapbiomas Brasil (2024), que são mapas em formato raster (.tif) obtidos a partir de uma classificação automática de imagens de satélite *Landsat*. Para o mapa utilizado nesse trabalho foi considerado a último mapa disponível na plataforma que foi do ano de 2022.

Para classificação de cada manejo do solo utilizou-se o banco de dados fornecido pelo Mapbiomas Brasil. Considerando que o SWAT disponibiliza um banco de dados global para classificação do uso e ocupação dos solos, realizou-se uma correlação desses usos a partir de um arquivo *csv* que foi inserido na simulação. O Quadro 4 indica as compatibilizações das classes de uso do solo que foram feitas para esse modelo.

Quadro 4 - Uso e ocupação do solo SWAT+

Uso do solo	Banco de dados SWAT	Código SWAT
Formação Florestal	Floresta	FRST
Formação Savânica	Floresta Decídua	FRSD
Silvicultura	Floresta Perenifólia	FRSE
Campo alagado, área pantanosa	Pântanos	WETL
Formação campestre	Pastagem	GRAS
Pastagem	Pastagem	PAST
Cana	Cana-de-açúcar	SUGC
Mosaico de usos	Terra Agrícola (Genérica)	AGRL
Áreas não vegetadas	Áreas não vegetadas	BARR
Rio, lago, oceano	Água (rios, lagos, oceanos)	WATR
Soja	Soja	SOYB
Lavoura	Terra Agrícola (Genérica)	AGRL
Café	Café	COFF
Citrus	Pomares	ORCD
Lavoura Perene	Terra Agrícola (Genérica)	AGRL

Fonte: Autora, (2024).

Para os mapas de classificação dos solos foi utilizada a classificação da EMBRAPA, entretanto essa classificação não existe no banco de dados do SWAT+. Nessa etapa foi necessário a inserção dos parâmetros dos solos que constituem as sub-bacias no banco de dados do modelo. Para isso, acessou-se o banco de dados do modelo e os tipos de solos foram inseridos com seus respectivos parâmetros. Utilizou-se como referência os parâmetros tabulados por Lima *et al.* (2013), no trabalho intitulado como Desenvolvimento de Base de Dados de Solos para a aplicação do Modelo SWAT em Bacia do Bioma Cerrado. A Tabela 2 ilustra os parâmetros alimentados no modelo conforme esse trabalho.

Tabela 2 – Parâmetros de solos para inserção no banco de dados do SWAT+

0 a 0,3 m	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z1	SOLZ_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1
Latossolo Vermelho	LV	3	A	300	300	0,9	0,12	612,2
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	3	A	300	300	0,94	0,11	1112,85
Gleissolo	GLE	2	D	300	300	0,87	0,13	494,44
0,3 a 1,0 m	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z2	SOLZ_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2
Latossolo Vermelho	LV	3	A	1000	1000	0,94	0,14	461,07
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	3	A	1000	1000	0,96	0,13	401,26
Gleissolo	GLE	2	D	1000	1000	0,87	0,13	494,44
1,0 a 3,5 m	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	SOL_Z3	SOLZ_BD3	SOL_AWC3	SOL_K3
Latossolo Vermelho	LV	3	A	2000	3500	0,94	0,14	142,32
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	3	A	2000	3500	0,96	0,13	230,05

continua

0 a 0,3 m	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	USLE K1
Latossolo Vermelho	1,67	59,93	28,37	12,94	0	0,018
Latossolo Vermelho Amarelo	1,69	57,36	24,61	18,03	0	0,019
Gleissolo	2,56	51,59	28,54	19,86	0	0,021
0,3 a 1,0 m	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	USLE K2
Latossolo Vermelho	1,01	66,28	22,93	10,79	0	0,015
Latossolo Vermelho Amarelo	0,95	64,37	20,54	15,09	0	0,017
Gleissolo	2,56	51,59	28,54	19,86	0	0,021
1,0 a 3,5 m	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	USLE K3
Latossolo Vermelho	1,01	66,28	22,93	10,79	0	0,015
Latossolo Vermelho Amarelo	0,95	64,37	20,54	15,09	0	0,017

Fonte: Adaptado de Lima et al., (2013).

Em seguida, foram definidas as faixas de declividade a serem consideradas para a simulação. Nesse modelo foram utilizadas as classificações da EMBRAPA, que considera os seguintes intervalos 0 a 3% (plano), 3 a 8% (suave ondulado), 8 a 20% (ondulado), 20 a 45% (forte ondulado), 45 a 75% (montanhoso) e acima de 75% (escarpado). Essa divisão de classes de declividade para a geração das HRUs é importante para que se consiga aumentar a variação topográfica das sub-bacias para a simulação. Nas duas sub-bacias simuladas o relevo variou de plano a ondulado, que significa de 0 a 20% de declividade.

Após inserir os mapas de manejo dos solos, classificação de solos e declividades, finalmente é possível definir os tipos de HRUs que se deseja obter. Nessa simulação foi considerado para definição das HRUs que pelo menos 5% da área total de uma sub-bacia deveria ser coberta por um determinado tipo de uso do solo, tipo de solo ou classe de declividade (Limites = 5,5,5 (%)). Esse tipo de determinação pode ser encontrado em outros trabalhos como Brandão (2024) e

Franco (2017). A partir dessa definição são criadas as unidades de resposta hidrológica para a simulação, sendo que as combinações podem ser encontradas na tela inicial do modelo.

3.5.3 Inserção de dados climáticos – SWAT+ Editor

A inserção dos dados climáticos é a terceira etapa da simulação, nessa fase será gerado pelo *SWAT Editor* um quadro resumo da simulação até essa etapa, considerando informações como a área total da sub-bacia, o período de simulação, a porcentagem para cada uso do solo, as quantidades de sub-bacias criadas, quantidade de canais, reservatórios e de HRUs, dentre outros parâmetros.

De acordo com Arnold et al. (2012), para os dados climáticos são necessários no mínimo as seguintes informações da estação pluviométrica organizados em arquivos txt em escala diária: precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Vale ressaltar que, quanto mais extenso os dados inseridos nessa etapa, maior será o período em que será possível rodar a simulação.

A série histórica utilizada nas simulações, como já explanado anteriormente, compreende o período de 01/01/2007 a 31/12/2023, esse período foi escolhido considerando que as medições da estação pluviométrica a partir dessa data possuem menos vazios de medições em comparação com os períodos anteriores, representando uma maior confiabilidade das informações a partir de 2007.

Finalmente, com todas as informações carregadas, o modelo pode ser executado. Como descrito anteriormente, a simulação pode ser feita dentro do período da série histórica definida na etapa de dados climáticos. De acordo com Mello et al. (2008), os primeiros anos da simulação são um período de incerteza para o modelo, isso porque o modelo desconhece as condições iniciais do local, por esse motivo, é possível inserir um período de aquecimento para a simulação, de forma que as condições iniciais da simulação não influenciem no resultado final, esse período é conhecido como *warmup* no SWAT.

Para a simulação desse trabalho considerou-se um *warmup* de 3 anos compreendendo o período de 01/01/2007 a 31/12/2009, em conformidade com estudos realizados, por exemplo, por

Brandão, (2024). Neitsch et al, (2005), estabelece que o período de aquecimento varie entre 2 e 10 anos. Em seguida, os modelos são simulados para os períodos de calibração, 01/01/2010 a 31/12/2015 e validação, 01/01/2016 a 31/12/2023. Foram escolhidas saídas mensais, anuais e uma saída que realiza uma média calculada ao longo dos anos.

Com base na metodologia de inserção dos dados no modelo SWAT, optou-se por não considerar explicitamente as captações e outorgas de água. Essa decisão foi tomada considerando que os valores outorgados não refletem necessariamente os volumes que foram efetivamente captados ao longo do tempo, o que poderia incorrer em um risco sistemático nas simulações. Além disso, conforme pode ser observado no item 3.3, são contabilizadas 138 outorgas na sub-bacia RBJ e 286 na sub-bacia ARU, o que corrobora para um custo computacional ainda mais alto do que o já ocupado pelo modelo, já bastante alto.

Ressalta-se que essa prática é consonante com a literatura técnica sobre esse tema, em que as captações não são inseridas por esses mesmos motivos. Dentre as referências estudadas, citam-se Júnior (2014), Oliveira (2016), Franco (2017), Junior (2016), Aragão et. al., (2013), entre outros. Sendo assim, procedeu-se à calibração dos modelos com os dados da estação fluviométrica Fazenda Letreiro e com os dados regionalizados das sub-bacia RBJ, reconhecendo que tais registros já refletem o impacto das captações existentes.

Vale ressaltar, que ao longo da obtenção e inserção dos dados no modelo SWAT muitas dificuldades e erros foram sendo encontrados no processo de manuseio com o programa, fazendo-se necessário a repetição de várias etapas, o estudo aprofundado do método e a inserção de diferentes maneiras dos dados ao longo da pesquisa até que se encontrou a maneira mais adequada para manejá-lo.

3.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como já explanado anteriormente, por se tratar de um *software* norte americano, o programa apresenta tendência em apresentar *outputs* mais calibrados para as regiões norte americanas, por esse motivo a análise de sensibilidade geralmente não é considerada como mais uma etapa da simulação do modelo SWAT+ nesses locais. Porém, para outras regiões, em que o processo de análise de sensibilidade e calibração após a simulação é essencial para identificar as

melhorias na modelagem, consistindo em uma extensão do processo de desenvolvimento do modelo. A apresentação de resultados sem a calibração pode comprometer de forma significativa a validação das simulações.

A análise foi realizada no software SWAT + *Toolbox*, versão 3.0.0, pelo método *Sobol*, técnica utilizada para identificar os parâmetros de entrada em um modelo, utilizando uma sequência de *Sobol*, de forma a gerar amostras que cobrem o espaço de parâmetros de entrada e permitem a exploração desses. O método realiza uma análise de sensibilidade global do modelo, considerando uma faixa de valores de parâmetros e utiliza índices de *Sobol* que quantificam a importância de cada parâmetro (Borges et al., 2023).

Para essa etapa foram selecionados doze parâmetros do modelo SWAT (Quadro 5), no período de 01/01/2010 e 31/12/2015, sendo que o período de 01/01/2010 a 31/12/2011 foi considerado período de aquecimento para realização da calibração. No total foram realizadas 1.100 iterações. Os parâmetros selecionados foram indicados como os mais sensíveis na simulação de vazões e análises de disponibilidade hídrica (OLIVEIRA, 2014; SALLES, 2012; BONUMÁ ET AL., 2013). Ressalta-se que nem todos os parâmetros indicados pelos autores foram considerados nessa etapa, visto que alguns desses não se encaixa com a realidade da bacia.

Quadro 5 – Parâmetros avaliados na análise de sensibilidade, limite inferior, limite superior dos parâmetros e método de variação

Parâmetros	Descrição	Limite inferior	Limite superior	Método de variação
ALPHA	Constante de recessão do escoamento de base (dias)	0	1	Substituição direta
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adimensional)	35	95	Substituição direta
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0	1	Substituição direta
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O mm solo-1)	0,01	1	Substituição direta
REVAP_CO	Coeficiente de evaporação das áreas úmidas para o lençol freático (adimensional)	0,02	0,2	Substituição direta
SLOPE	Armazenamento máximo do dossel (mm)	0,0001	0,9	Substituição direta
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado (mm h ⁻¹)	0,0001	2000	Substituição direta
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)	0,05	24	Substituição direta
CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm)	0	100	Substituição direta
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)	0,9	2,5	Substituição direta

Fonte: Autora, (2025).

Destaca-se que a alteração dos parâmetros nessa etapa de análise de sensibilidade dentro do *SWAT+ Toolbox* pode ser realizada de três formas: por substituição direta, quando o valor do parâmetro é alterado em toda a área de estudo para o valor informado; por valor relativo, nesse caso o parâmetro tem o valor original alterado de acordo com o intervalo de acréscimo ou decréscimo inserido; por percentual, o valor do parâmetro altera-se dentro da faixa de limites estabelecida (NOGUEIRA, 2023).

Após a definição dos limites inferiores e superiores de cada parâmetro, foi inserida na aba observações, a série temporal de vazões mensal das bacias da estação fluviométrica 60381000 (Fazenda Letreiro). Ressaltando que, para a sub-bacia ARU foram utilizados os dados observados da estação e para a sub-bacia RBJ utilizou-se os dados de vazão regionalizados. Para essa etapa foram rodadas 360 iterações.

3.7 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração do modelo procede a etapa de análise de sensibilidade. Após a obtenção dos parâmetros mais sensíveis da simulação, esses são ordenados e os parâmetros não sensíveis são descartados da calibração. A calibração do modelo foi realizada de forma manual e automática utilizando-se o *software SWAT+ Toolbox*.

Os índices estatísticos NSE e PBIAS foram calculados a fim de se obter, de forma prévia à calibração, a qualidade da simulação do modelo. Os cálculos seguiram as equações descritas no item 2.3.4. Após os cálculos, os parâmetros mais sensíveis de entrada foram alterados até que o ajuste dos parâmetros atendesse às funções escolhidas, atendendo às funções de desempenho selecionadas.

Assim como na etapa anterior, da análise de sensibilidade, o período utilizado para calibração do modelo foi de 01/01/2010 e 31/12/2015, sendo que o período de 01/01/2010 a 31/12/2011 foi utilizado como período de aquecimento para a etapa de calibração. A metodologia escolhida foi o Dynamically Dimensioned Search (DDS), que é um algoritmo de otimização global heurístico, ou seja, que busca a melhor solução para um problema dentro de um conjunto de possíveis soluções, e probabilístico. O DDS foi proposto para desenvolver problemas de otimização contínua, demonstrando ser especialmente relevante para resolução de problemas de alta dimensão (TOLSON E SHOEMAKER, 2007). Nessa etapa, foram realizadas aproximadamente 80 iterações para alcançar uma calibração satisfatória, ou seja, com parâmetros que atendessem aos intervalos dos índices de qualidade da simulação.

Após a obtenção dos parâmetros ajustados, os índices NSE e PBIAS foram recalculados para analisar se os resultados obtidos melhoraram de forma eficaz a qualidade do modelo. Depois, utilizou-se o SWAT Editor para substituir os valores iniciais dos parâmetros pelos novos valores, que demonstraram melhor ajuste no modelo.

Na validação do modelo, os parâmetros calibrados foram utilizados para o período de 01/01/2016 a 31/12/2023. Os resultados obtidos também foram analisados utilizando os índices estatísticos estabelecidos, NSE, PBIAS e R².

3.8 CURVA DE PERMANÊNCIA

Em uma análise de balanço hídrico de uma bacia, a determinação da curva de permanência se demonstra como uma ferramenta importante (Viana et al., 2018), pois expressa uma relação entre a magnitude e a frequência das vazões em um intervalo definido. A partir disso, pode-se estimar a porcentagem do tempo em que uma vazão pode ser iguala ou ultrapassada ao longo do período histórico.

Além disso, a curva de permanência é uma ferramenta estatística para avaliar a disponibilidade hídrica de um curso de água, sendo muito utilizada também para fins de outorga de direitos de uso da água. Nesse estudo, a construção da curva de permanência se deu da seguinte forma, as vazões foram ordenadas de forma decrescente e o gráfico foi plotado considerando todos as medidas de vazão e suas respectivas porcentagens de ocorrerem e serem superadas. As curvas de permanência elaboradas, foram utilizadas para avaliar a disponibilidade hídrica por meio da Q₉₀, que corresponde à vazão que é superada em 90% do período da série de dados.

Ainda, no intuito de avaliar as sub e superestimativas do modelo, utilizou-se as curvas de permanência plotando-se os valores simulados e os valores observados, e a partir de uma linha de tendência potencial foram encontradas as equações corrigidas para os dois modelos.

3.9 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Após a validação do modelo nas 2 sub-bacias estudadas, foram propostas simulações de cenários com o objetivo de avaliar situações nas bacias e sua interferência nas vazões. De forma geral, os cenários podem analisar tanto as condições atuais da bacia, como verificar a condição passada, avaliar impactos futuros a depender de modificações no uso do solo, nos dados climáticos dentre outros, de forma a permitir a análise do comportamento da bacia estudada (JÚNIOR, 2014).

Para essa etapa do estudo os cenários foram feitos da seguinte forma, com a simulação calibrada no SWAT+ toolbox, utilizou-se os parâmetros de calibração no modelo e propôs-se 2 cenários para analisar a disponibilidade hídrica das sub-bacias do RBJ e ARU. Ressalta-se que essa pesquisa não tem como objetivo principal caracterizar de forma exaustiva a eficiência de

diferentes manejos nas bacias, e sim de demonstrar as aplicação do modelo SWAT+, combinado com o uso de SIG, como suporte ao gerenciamento dos recursos hídricos e para a tomada de decisões.

Como já descrito, foram propostos 2 cenários, sendo que o Cenário 0 consiste no Cenário Atual de disponibilidade hídrica das sub-bacias e os outros terão seus valores comparados com esse. O primeiro cenário trata-se de uma redução contínua do período chuvoso em 20% durante 17 anos, período da simulação. Já o segundo cenário consiste em uma simulação que substitui ocupações agrícolas, como soja, cana de açúcar e outras lavouras por floresta nativa.

A proposta desses cenários objetiva simular as possíveis alterações nas respostas de vazão no exutório. Os resultados poderão ser observados a partir das curvas de permanência que demonstrarão a disponibilidade hídrica em cada cenário, identificando as alterações na produção de água na bacia. As vazões utilizadas na criação das curvas de permanência foram as médias diárias mensais simuladas no período de 01/01/2010 e 31/12/2023 e a disponibilidade hídrica foi baseada nas vazões Q₉₀ simuladas.

3.9.1 Cenário Atual (Cenário 0)

O Cenário Atual, também chamado de Cenário 0, foi elaborado com a simulação calibrada no período de 01/01/2010 a 31/12/2023. As informações obtidas das vazões calibradas foram dispostas na curva de permanência e após a correção da equação com os valores observados, foi determinada a Q₉₀ para cada uma das sub-bacias. Os valores encontrados foram utilizados de referência na comparação com os demais cenários propostos.

3.9.2 Cenário de redução de precipitação (Cenário I)

O Cenário 1 consiste na alteração dos padrões de chuvas nas duas sub-bacias, considerando uma redução em 20% das precipitações em todo o período da simulação, 17 anos. Para isso, coletou-se os valores diários de precipitação e aplicou-se a redução em 20% nos valores maiores que zero. A Tabela 3 demonstra um resumo das precipitações anuais obtidas para esse cenário.

Tabela 3 - Resumo das precipitações anuais para criação do Cenário 1

Resumo das precipitações anuais		
Cenário	0 (atual)	1
Ano	Precipitação	Precipitação (20% menor)
2007	1626,00	1300,80
2008	1749,7	1399,76
2009	2039,7	1631,76
2010	1315,22	1052,57
2011	1520,33	1216,80
2012	1462,35	1170,40
2013	1702,85	1363,20
2014	1136,50	909,92
2015	1503,34	1203,20
2016	1698,45	1359,36
2017	1356,80	1085,92
2018	1613,69	1291,52
2019	1259,24	1008,00
2020	1656,07	1325,44
2021	1271,24	1017,44
2022	1415,98	1133,28
2023	1348,41	1079,20

Fonte: Autora, (2025).

Esse cenário se mostra relevante para avaliação dos impactos das mudanças climáticas e variações nos padrões de precipitação sobre os recursos hídricos. A redução da precipitação permite analisar a disponibilidade hídrica e a recarga do lençol freático em um cenário de seca prolongada. É importante ressaltar que compreender os impactos que esse tipo de mudança gera nas sub-bacias pode auxiliar no planejamento de estratégias frente aos eventos de mudanças climáticas.

3.9.3 Cenário de alteração no uso do solo (Cenário 2)

O Cenário 2 proposto para simulação consiste na alteração de uso do solo. Para esse cenário propôs-se as seguintes alterações para as sub-bacias RBJ e ARU, os usos relacionados a plantação de cana de açúcar, terras agrícolas e plantações de soja foram substituídas por formações florestais. Para criação desse cenário utilizou-se a imagem raster de uso e ocupação do solo, como descrito anteriormente, e alterou-se a classificação dos uso solos relacionados a

ocupações agrícolas por formações florestais dentro do QGIS. Após isso o novo mapa foi inserido no modelo.

De acordo com Oliveira (2014), diversos estudos no Brasil empregam o modelo SWAT para prever alterações no uso e ocupação do solo, visando avaliar processos hidrológicos e de transporte de sedimentos. De acordo com a autora, ainda que exista variação em termos de magnitude nos resultados de cada estudo, a maioria dos pesquisadores demonstram que as mudanças do uso do solo são um fator essencial para a análise das vazões em bacias. As Tabelas 4 e 5 apresentam o percentual proposto de cada uso dentro das sub-bacias. Ressaltando que o significado de cada código está contido no Quadro 4.

Tabela 4 - Comparativo do percentual de uso do solo para criação do Cenário 2 – Sub-bacia RBJ

Comparativo do percentual de uso do solo - Sub-bacia RBJ				
Cenário	0 (Atual)		2	
Código	Área (ha)	Percentual (%)	Área (ha)	Percentual (%)
SOYB	15.257,40	37,08	0,00	0,00
AGRL	8.723,82	20,96	0,00	0,00
GRAS	2.406,78	5,85	2.406,78	5,85
FRSD	1007,8	2,45	1007,8	2,45
PAST	4.728,09	11,49	4.728,09	11,49
WETL	2.494,72	6,06	2.494,72	6,06
FRST	1.216,75	2,96	29.866,14	72,41
WETW	157,42	0,38	157,42	0,38
BARR	70,08	0,17	70,08	0,17
ORCD	411,56	1,00	411,56	1,00
FRSE	101,53	0,25	101,53	0,25
SUGC	4668,17	11,35	0,00	0,00

Fonte: Autora, (2025).

Tabela 5 – Comparativo do percentual de uso do solo para criação do Cenário 1 – Sub-bacia ARU

Comparativo do percentual de uso do solo - Sub-bacia ARU				
Cenário	0 (Atual)		2	
Código	Área (ha)	Percentual (%)	Área (ha)	Percentual (%)
SOYB	35.714,27	48,09	0,00	0,00
AGRL	9.177,91	12,36	0,00	0,00
BARR	120,79	0,16	120,79	0,16
FRSD	1.585,60	2,14	1.585,60	2,14
PAST	5.323,66	7,17	5.323,66	7,17
WETL	1.835,38	2,47	1.835,38	2,47
GRAS	8.181,84	11,02	8.181,84	11,02
FRST	2.235,15	3,01	51.720,70	69,64
WETW	139,61	0,19	139,61	0,19
COFF	61,68	0,08	61,68	0,08
ORCD	28,64	0,04	28,64	0,04
FRSE	5.268,51	7,09	5.268,51	7,09
SUGC	4.593,37	6,18	0,00	0,00

Fonte: Autora, (2025).

Observa-se para essa situação que o percentual de área com ocupação de formação florestal passou de 2,96% e 3,01% nas sub-bacias RBJ e ARU, respectivamente, para 72,41% e 69,64%. Essa alteração poderá auxiliar no entendimento da dinâmica dos usos da terra e as respostas do modelo para a produção de água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção dos resultados e discussões abordará as principais etapas e análises realizadas no estudo, com o objetivo de compreender e interpretar os resultados obtidos. Inicialmente, serão apresentados os gráficos e tabelas relacionados às estações de monitoramento utilizadas, englobando as estações climáticas e fluviométricas. Em seguida, será tratada a regionalização de vazões para a sub-bacia RBJ, demonstrando os resultados obtidos com a extração dos dados da sub-bacia ARU. Posteriormente, serão demonstradas as saídas do modelo SWAT com a avaliação das simulações e a análise dos resultados sem calibração. Depois disso, serão detalhadas a análise de sensibilidade, o processo de calibração, validação, elaboração das curvas de permanência e determinação da Q90, etapas necessárias para garantir a confiabilidade dos resultados. Por fim, serão discutidos os cenários projetados, que permitem explorar as implicações das condições analisadas.

4.1 ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

4.1.1 *Estação climáticas*

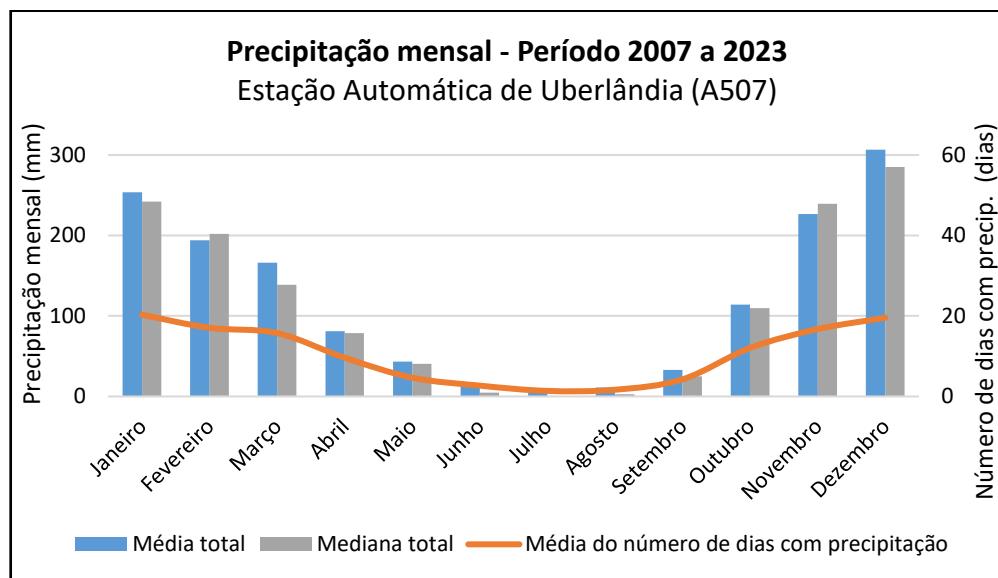
A Figura 22 ilustra as médias mensais de precipitação monitoradas pela Estação Automática da UFU (A507). Os dados apresentados consideram o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2023, com as médias mensais de precipitação, as medianas e também a média do número de dias com precipitação ao longo dos meses.

Por meio desse gráfico é possível observar que os valores das medianas se aproximaram dos valores das médias calculadas, o que demonstra a ausência de distorções significativas nos dados e também que a distribuição dos dados se dá de forma simétrica.

Na Figura 23 está ilustrado o gráfico contendo os dados climáticos que serão relevantes para a simulação, como a pressão atmosférica média mensal, a velocidade média do vento e a temperatura média mensal, para o mesmo período de janeiro de 2007 a dezembro de 2023. Pelo gráfico é possível observar que não ocorre variação significativa nas velocidades médias do

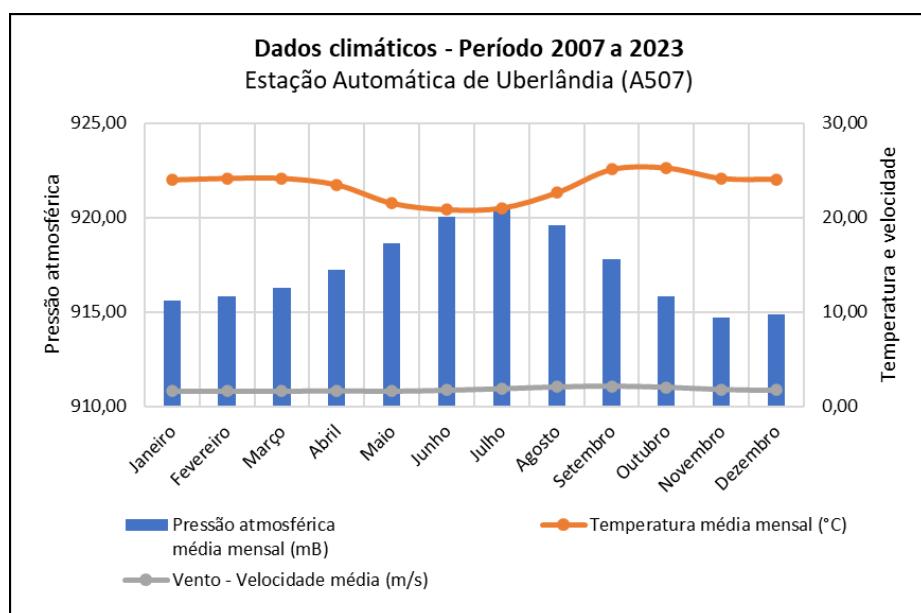
vento e que a pressão atmosférica e temperatura sofrem variações ao longo do ano. A Tabela 6 demonstra os valores médios utilizados na elaboração dos gráficos.

Figura 22 - Precipitação mensal - período 2007 a 2023



Fonte: Autora, (2024)

Figura 23 – Dados climáticos – Período 2007 a 2023



Fonte: Autora, (2024).

Tabela 6 - Dados meteorológicos calculados para as sub-bacias

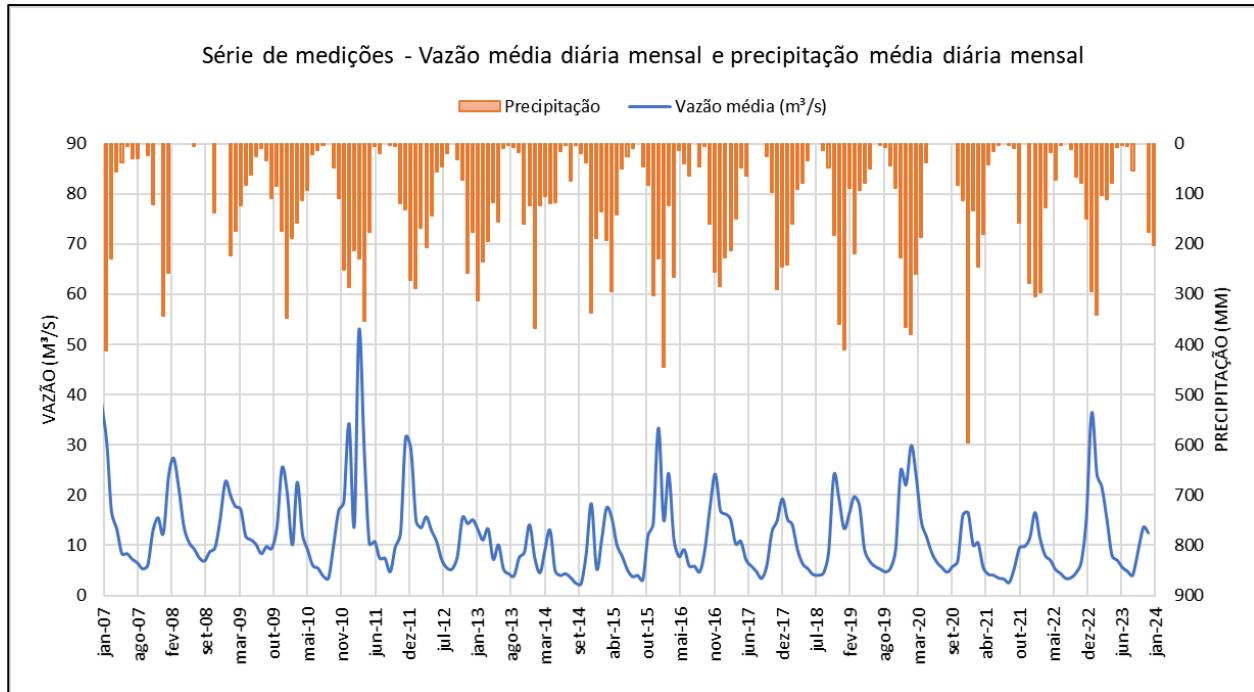
	Pressão atmosférica média mensal (mB)	Temperatura média mensal (°C)	Vento - Velocidade de média (m/s)	Média		Mediana
				Precipitação total (mm)	Número de dias com precipitação (dias)	
Janeiro	915,58	23,98	1,64	253,6	20,29	242,0
Fevereiro	915,80	24,14	1,62	194,2	17,06	202,0
Março	916,26	24,14	1,62	166,3	15,75	138,8
Abril	917,23	23,46	1,67	81,0	9,63	78,6
Maio	918,64	21,52	1,63	43,3	4,67	40,6
Junho	920,04	20,84	1,72	14,4	2,69	4,8
Julho	920,41	21,00	1,88	9,3	1,38	0,3
Agosto	919,59	22,63	2,06	11,0	1,67	2,9
Setembro	917,77	25,08	2,13	32,8	4,25	25,2
Outubro	915,82	25,23	2,02	114,2	12,06	109,8
Novembro	914,71	24,13	1,80	226,8	16,73	239,4
Dezembro	914,86	24,06	1,71	306,8	19,56	285,3

Fonte: Autora (2024).

4.1.2 Estação fluviométrica

O gráfico da Figura 24 ilustra os dados fluviométricos coletados na Estação Fazenda Letreiro, 60381000, a partir de uma média mensal que varia de janeiro de 2007 a dezembro de 2023. Ainda, no eixo secundário observa-se os valores médios de precipitação da estação A507 como demonstrado na Figura 22. Os dados de precipitação foram inseridos para que seja possível avaliar as respostas da vazão considerando os eventos de precipitação.

Figura 24 - Série de medições - Vazão média mensal e precipitação média mensal



Fonte: Autora, (2024).

Pelo gráfico é possível observar que o tempo de concentração da bacia é relativamente curto, visto que as águas das chuvas escoam rapidamente para os rios. Para verificar essa informação, calculou-se o tempo de concentração da bacia utilizando a Fórmula de Giandotti (Equação 5).

$$Tc = \frac{\sqrt{A} + 1,5 \times L}{0,8 \sqrt{H}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

A – Área da bacia em Km²;

L – Comprimento horizontal desde a saída até o ponto mais afastado da bacia em Km;

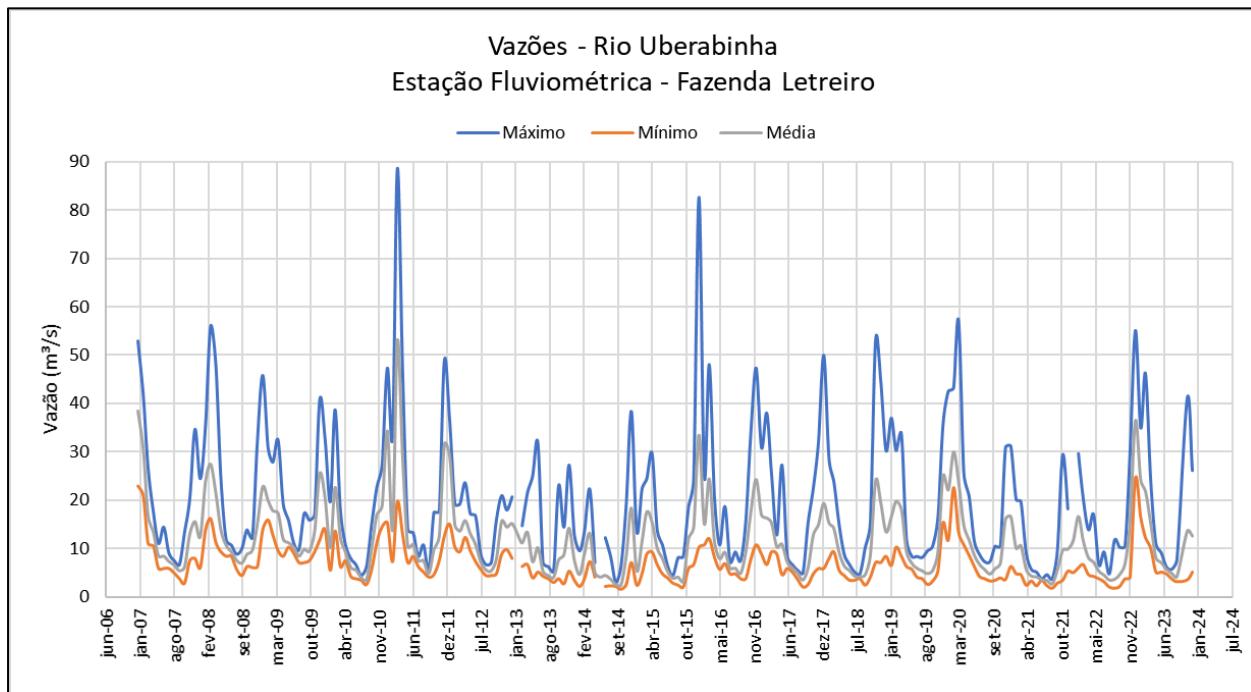
H – Diferença de cotas entre a saída e o ponto mais afastado da bacia em m.

O valor do Tc obtido para a sub-bacia ARU foi de 12,46 horas, demonstrando que os picos de vazão são uma resposta aos eventos de precipitação. Esse comportamento reflete uma resposta rápida do sistema hidrológico da região às chuvas intensas, típicas do verão. Isso significa que boa parte da precipitação é rapidamente convertida em escoamento superficial, que contribuem para os picos de vazão observados. Essas ocorrências podem ser atribuídas a fatores como características do tipo de solo, uso da terra, e hipsometria da bacia, que favorecem o escoamento

em detrimento da infiltração (ARANTES, s.d.). Durante os meses de inverno observa-se vazões significativamente menores, o que evidencia a dependência direta do regime hídrico da bacia em relação à precipitação.

Para ilustrar melhor esses eventos, o gráfico da Figura 25 demonstra além da vazão média já visualizada no gráfico da Figura 24, as vazões mínimas e máximas diárias obtidas para cada mês do ano ao longo da série temporal. Com esse gráfico, é possível observar de forma ainda mais clara o efeito da precipitação nas vazões diárias medidas no rio. Apenas ressaltando que os saltos observados nas dispersões do gráfico da Figura 25, tratam-se de períodos em que algum dado não foi computado no processamento da estação.

Figura 25 – Vazões máximas, mínimas e médias diárias monitoradas



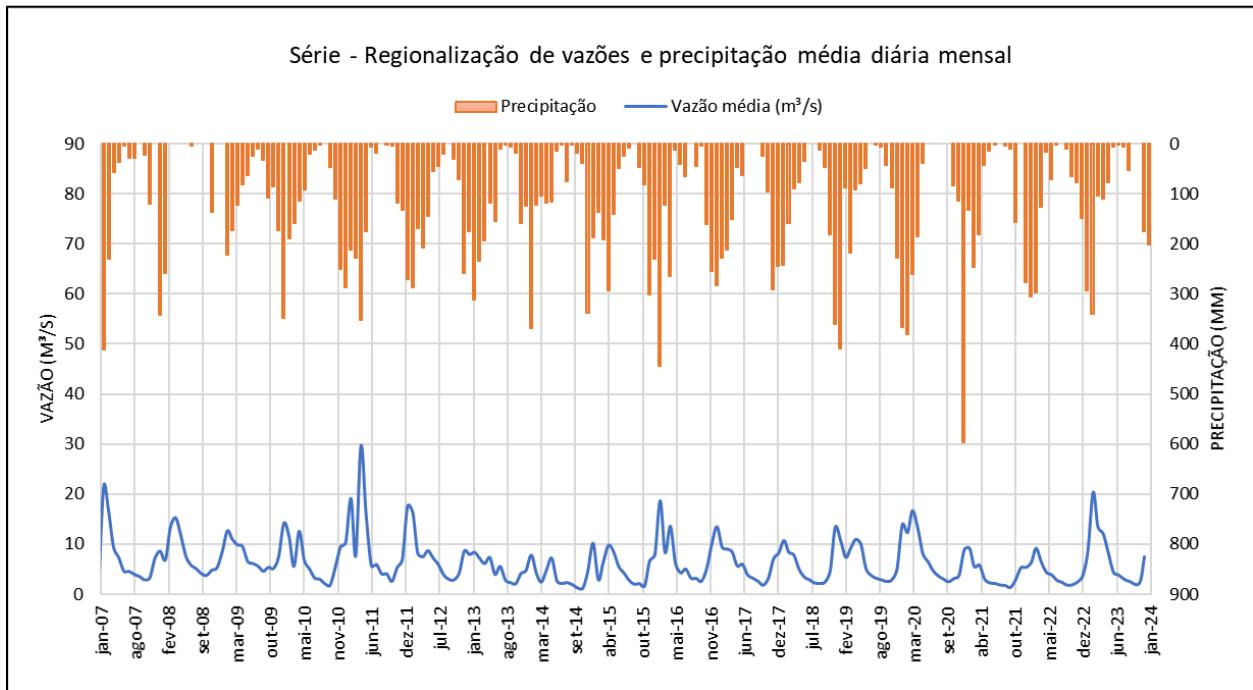
Fonte: Autora, (2024).

4.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

O gráfico da Figura 26, resultante da regionalização de vazões para o Ribeirão Bom Jardim, apresenta os valores médios mensais de vazão, demonstrando a variação do regime hídrico ao longo do ano. No eixo principal são plotadas as vazões obtidas a partir do processo de regionalização, destacando os períodos de maior e menor disponibilidade hídrica. No eixo

secundário, são representadas as precipitações mensais medidas na estação A507, permitindo visualizar a relação direta entre os volumes precipitados e a resposta do corpo hídrico.

Figura 26 - Vazões regionalizadas - Ribeirão Bom Jardim



Fonte: Autora, (2024).

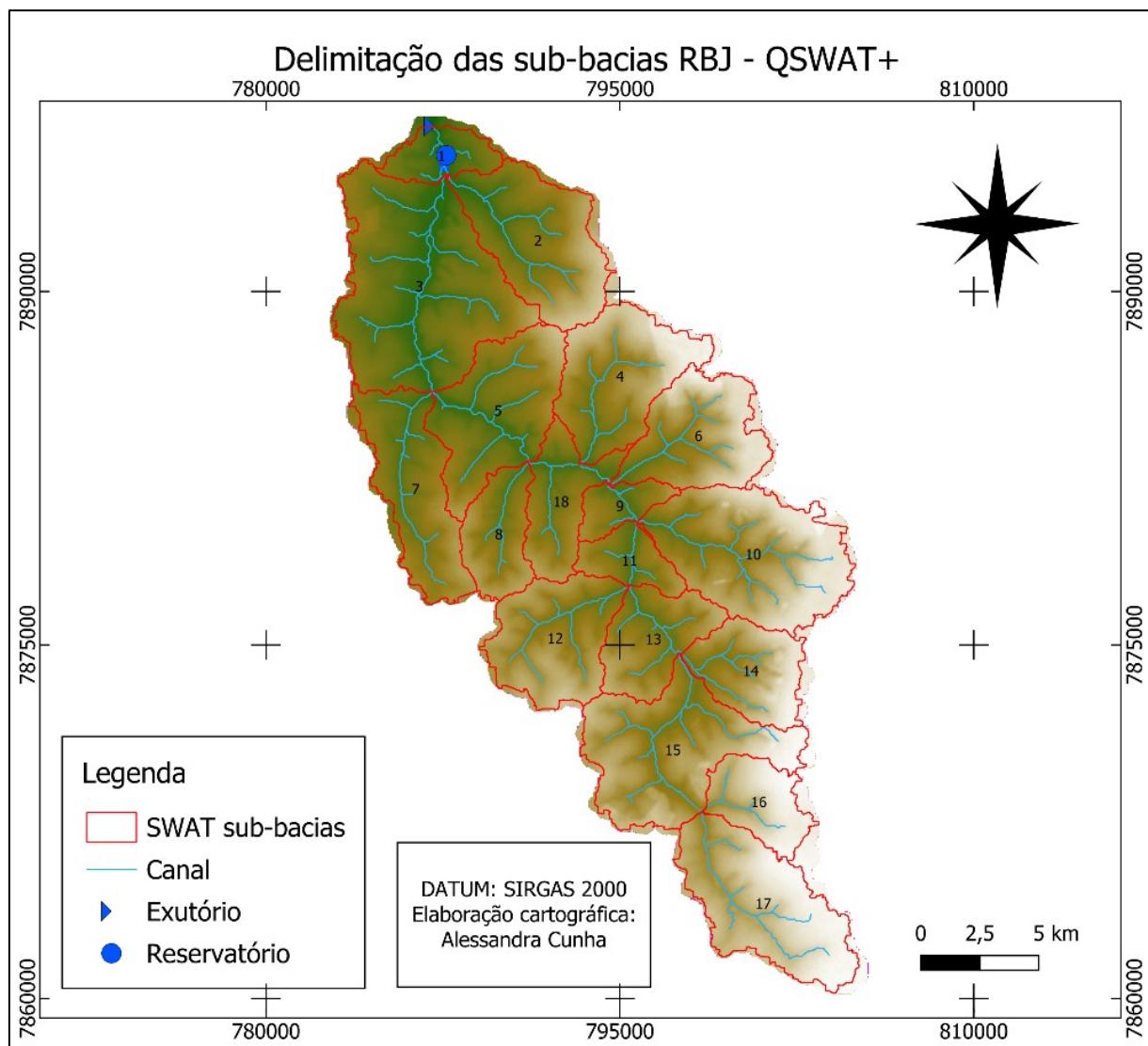
Para a sub-bacia RBJ o Tc encontrado foi de 12,10 horas, valor próximo ao encontrado para a sub-bacia ARU. Além disso, a análise do gráfico reforça o comportamento sazonal característico da região, em que nos meses chuvosos, concentrados no verão, se verificam os picos de vazão, enquanto os meses de inverno, mais secos, apresentam vazões reduzidas. As informações resultantes demonstradas nesse gráfico serão utilizadas na calibração e validação das simulações na sub-bacia RBJ.

4.3 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES NO MODELO SWAT

Como descrito na etapa de metodologia, a primeira etapa da simulação do modelo SWAT+ consiste na demarcação das sub-bacias pelo programa. As Figuras 27 e 28 apresentam os mapas gerados nessa primeira etapa de simulação, destacando a configuração espacial das sub-bacias delimitadas no estudo. Elas ilustram a demarcação das sub-bacias, indicando seus exutórios, a localização do reservatório, a rede hidrográfica da área modelada e suas respectivas

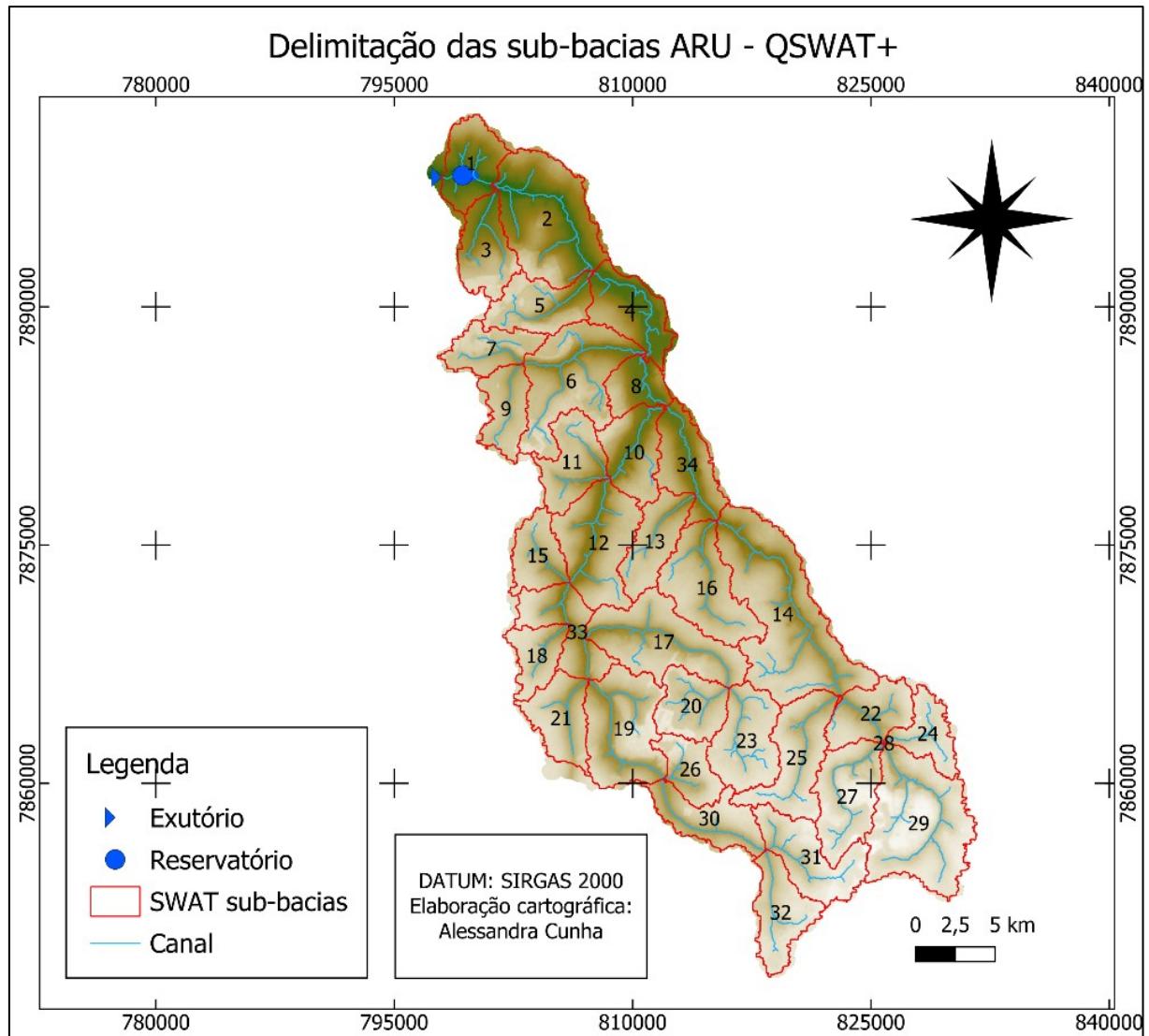
numerações, permitindo uma identificação clara de cada unidade. Essa primeira etapa é essencial para compreender a estrutura da bacia hidrográfica e facilitar a análise dos processos hidrológicos pelo *software*.

Figura 27 - Delimitação das sub-bacias RBJ



Fonte: Autora, (2024).

Figura 28 - Delimitação da sub-bacia ARU



Fonte: Autora, (2024).

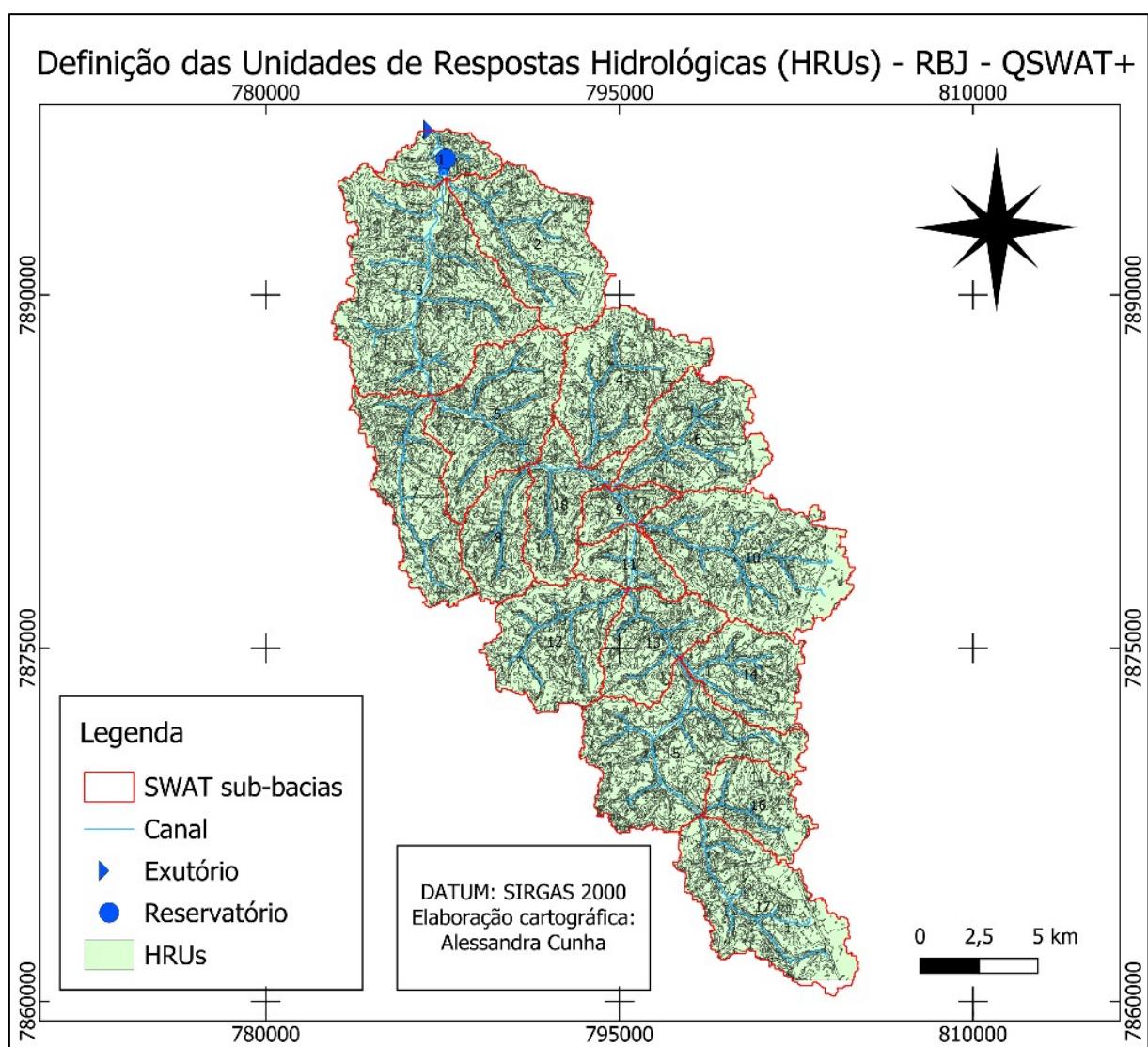
Cada numeração verificada nas Figuras 27 e 28 trata-se das divisões de áreas das sub-bacias, sendo que, para cada região numerada, a tabela de atributos atribui uma área e outras informações relacionadas a esse polígono. Ao final do processo foram geradas 18 sub-bacias para a RBJ e 34 sub-bacias para o ARU.

Na segunda etapa da simulação são utilizados os mapas de solos, do uso e ocupação da terra e a determinação das declividades, para que, combinando essas informações, seja feita a definição das HRUs. Ao estabelecer que pelo menos 5% da área total de uma sub-bacia seja coberta por um determinado tipo de solo, uso de solo ou classe de declividade, uma simplificação na representação da combinação desses dados é feita, excluindo combinações minoritárias que

podem ser irrelevantes para os resultados globais. Sendo assim, apesar dessa simplificação induzir que algumas áreas sejam desconsideradas, essa abordagem reduz a complexidade e o tempo de processamento do *software*, etapa fundamental para que o modelo possa ser executado de maneira um pouco mais célere.

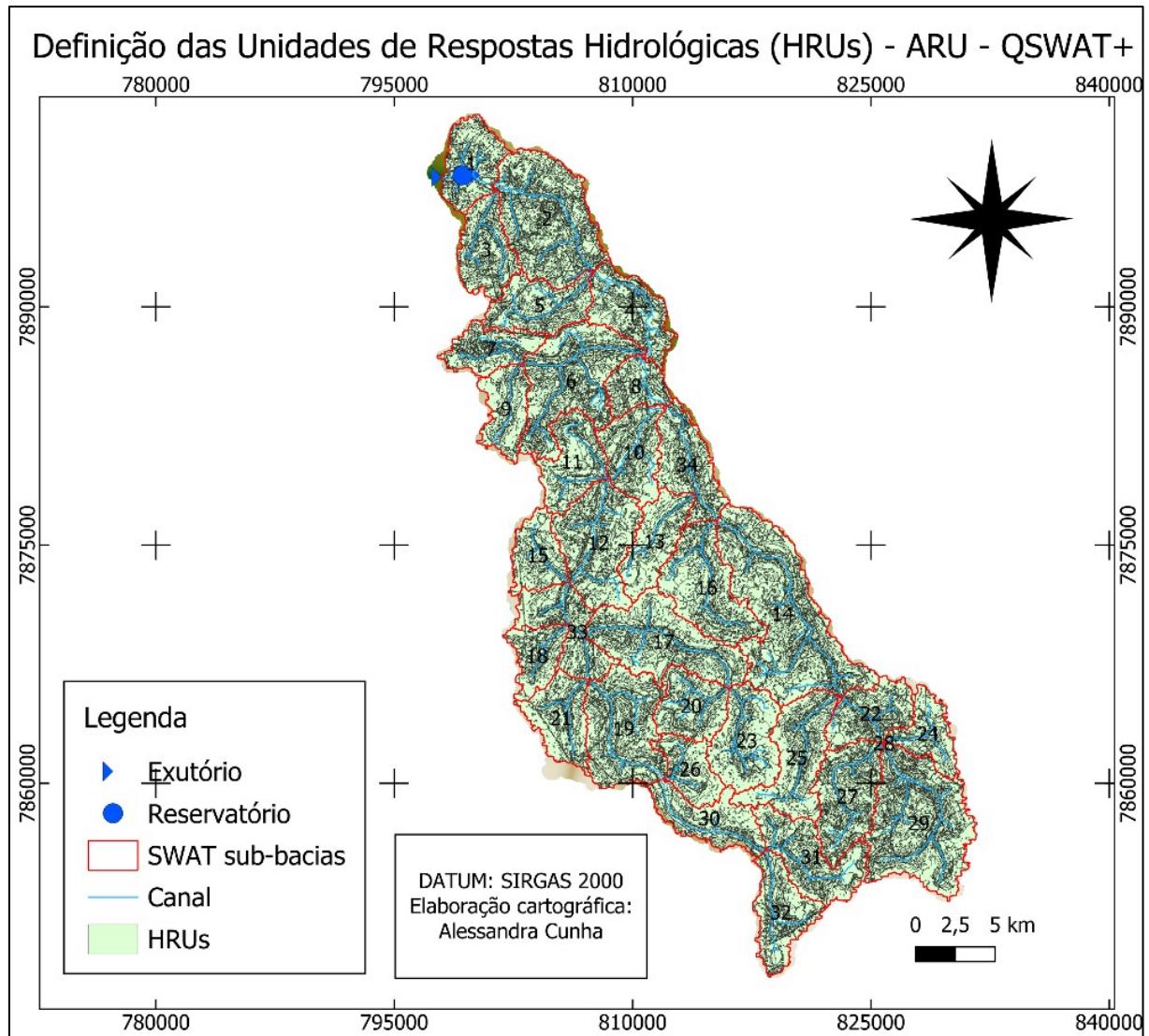
Para essa simulação foram obtidas as seguintes quantidades: para a sub-bacia RBJ obteve-se 2705 HRUs e para a sub-bacia ARU 3266 HRUs gerados pelo *software* com base nas informações de entrada descritas na metodologia. As Figuras 29 e 30 ilustram os mapas do modelo após a criação das HRUs.

Figura 29 - Criação das HRUs – Sub-bacia RBJ



Fonte: Autora, (2024).

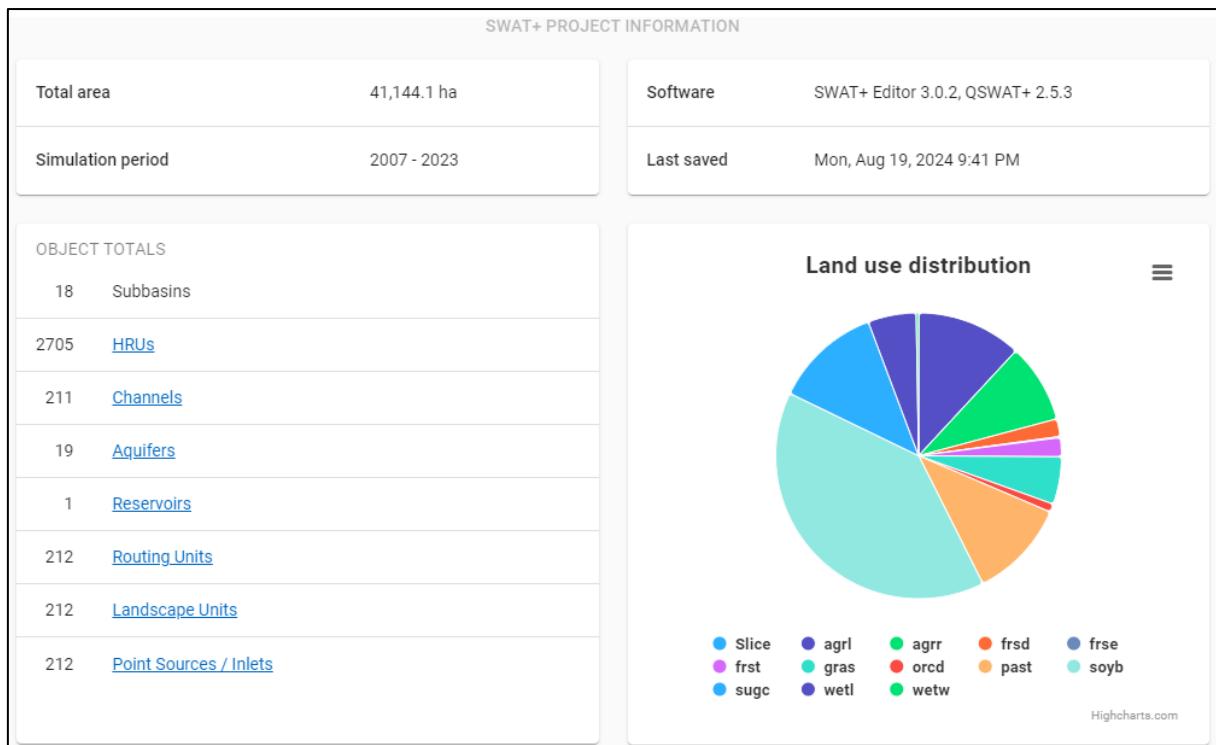
Figura 30 - Criação das HRUs – Sub-bacia ARU



Fonte: Autora, (2024).

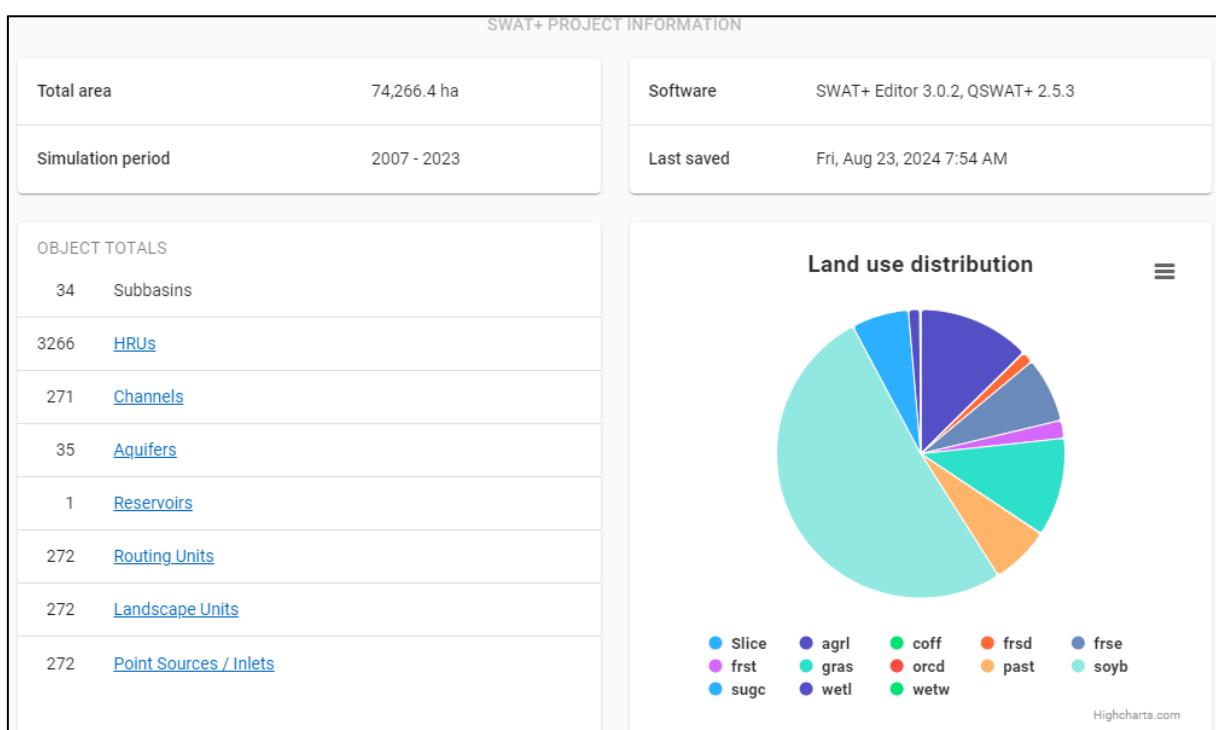
Após a definição das HRUs das bacias simuladas, a terceira etapa consiste na inserção dos dados climáticos no modelo. Nessa etapa, o programa gera, por meio do *SWAT Editor*, um quadro resumo com as informações relevantes determinadas até aquele momento da simulação. Dentre as informações estão: área da bacia, período da simulação, versão do software utilizada, quantidade de sub-bacias, quantidade de canais, aquíferos, reservatório, HRUs, unidades de paisagem, classificação da distribuição do uso do solo e outros. As Figura 31 e 32 ilustram esse quadro para cada uma das simulações.

Figura 31 - Quadro resumo da simulação RBJ



Fonte: Autora, (2024).

Figura 32 - Quadro resumo da simulação ARU



Fonte: Autora, (2024).

Para inserção dos dados climáticos foram utilizados os dados da estação A507 conforme já demonstrado no item 4.1.1. A inserção dos dados climáticos se divide em duas partes, sendo a primeira etapa utilizada para inserir os valores diários de cada parâmetro solicitado em arquivos de texto (*.txt*), e a segunda parte utiliza o *Weather Generator*, que consiste em um gerador de clima existente no SWAT+, que auxilia na criação de dados climáticos sintéticos para a realização das simulações. A combinação desses dados observados e gerados permite que sejam criados um conjunto de informações meteorológicas contínuas, que são essenciais para que a simulação seja mais consistente. A Tabela 7 mostra os parâmetros gerados por essa ferramenta e que foram inseridos na simulação.

Tabela 7 – Resumo dos parâmetros climáticos

id	month	tmp_max_ave	tmp_min_ave	tmp_max_sd	tmp_min_sd	pcp_ave	pcp_sd	pcp_ske_w
236857	1,00	27,89	19,19	3,22	1,29	285,75	12,31	4,06
236858	2,00	27,66	19,04	2,80	1,27	244,96	12,36	3,77
236859	3,00	27,17	18,70	2,53	1,40	237,96	11,82	4,12
236860	4,00	26,99	17,51	2,56	1,80	89,57	7,28	7,08
236861	5,00	26,06	15,30	2,83	2,34	32,18	4,07	11,58
236862	6,00	26,17	14,17	2,56	2,43	10,85	2,16	14,82
236863	7,00	27,43	14,56	2,70	2,34	4,67	0,96	11,44
236864	8,00	30,60	16,84	3,14	2,40	7,19	1,80	12,75
236865	9,00	33,55	19,30	3,54	2,29	24,58	3,28	7,26
236866	10,00	33,56	20,23	4,07	1,99	109,65	9,59	7,56
236867	11,00	31,17	19,63	4,19	1,66	197,56	11,68	4,08
236868	12,00	29,03	19,49	3,94	1,39	302,52	12,58	3,37

continua

id	wet_dry	wet_wet	pcp_days	pcp_hhr	slr_ave	dew_ave	wnd_ave	wgn_id
236857	0,46	0,48	26,72	43,56	21,92	0,85	1,93	19739,00
236858	0,43	0,48	23,56	45,36	22,64	0,85	1,86	19739,00
236859	0,41	0,48	25,22	46,24	20,57	0,87	1,80	19739,00
236860	0,24	0,44	16,44	35,79	18,99	0,83	1,93	19739,00
236861	0,16	0,38	9,13	28,43	16,52	0,79	2,03	19739,00
236862	0,07	0,35	3,41	17,04	16,02	0,68	2,20	19739,00
236863	0,04	0,28	1,78	6,35	16,75	0,56	2,42	19739,00
236864	0,04	0,31	1,84	10,60	19,45	0,45	2,62	19739,00
236865	0,09	0,36	4,91	15,25	21,64	0,43	2,68	19739,00
236866	0,20	0,43	12,66	53,80	22,46	0,54	2,47	19739,00
236867	0,35	0,45	19,53	38,55	22,19	0,69	2,29	19739,00
236868	0,45	0,48	25,72	47,91	21,74	0,80	2,02	19739,00

Fonte: Autora, (2024).

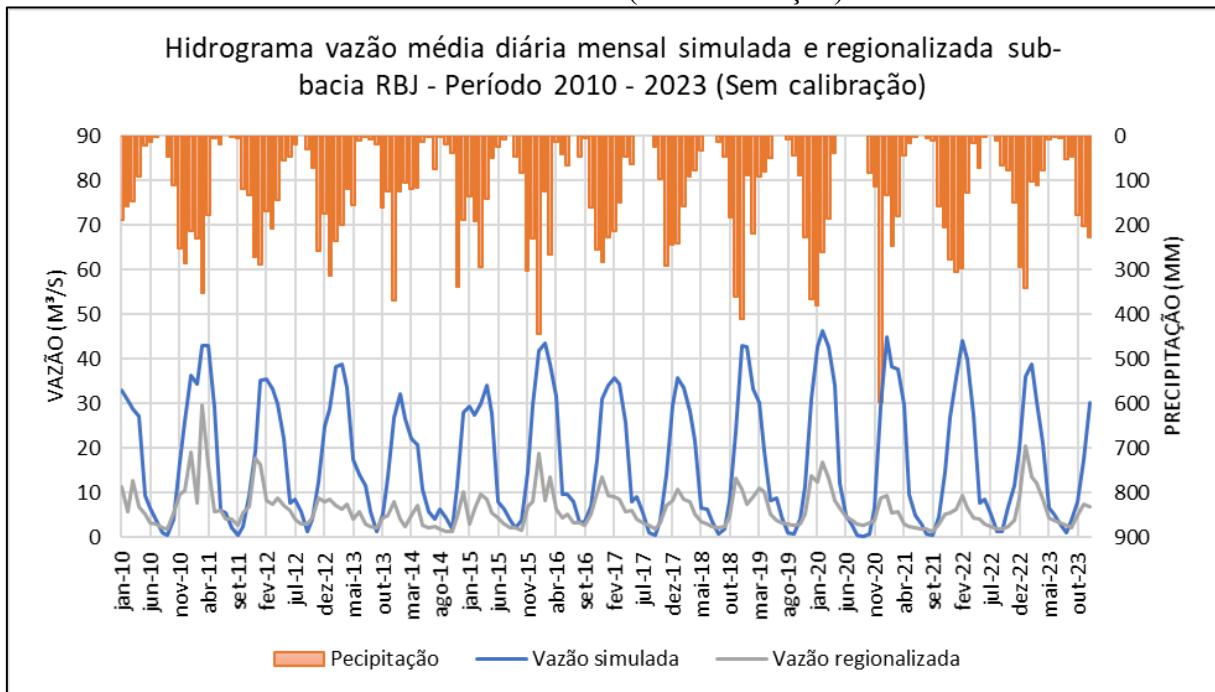
Considerando que os parâmetros qualitativos também simulados pelo *software* não são objeto de estudo desse trabalho, esses foram desconsiderados, sendo que após a inserção dos dados climáticos a simulação foi executada.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS (SEM-CALIBRAÇÃO)

Após a execução do modelo no SWAT+, o sistema inicia a execução dos cálculos hidrológicos e ambientais com base nos parâmetros definidos para essa simulação. Após os cálculos, entre os resultados obtidos estão os de vazões para os rios, em arquivos de texto (*.txt*), que variam de acordo com o período escolhido, em uma etapa que antecede a execução da simulação, podendo ser em escala mensal, anual ou uma média geral.

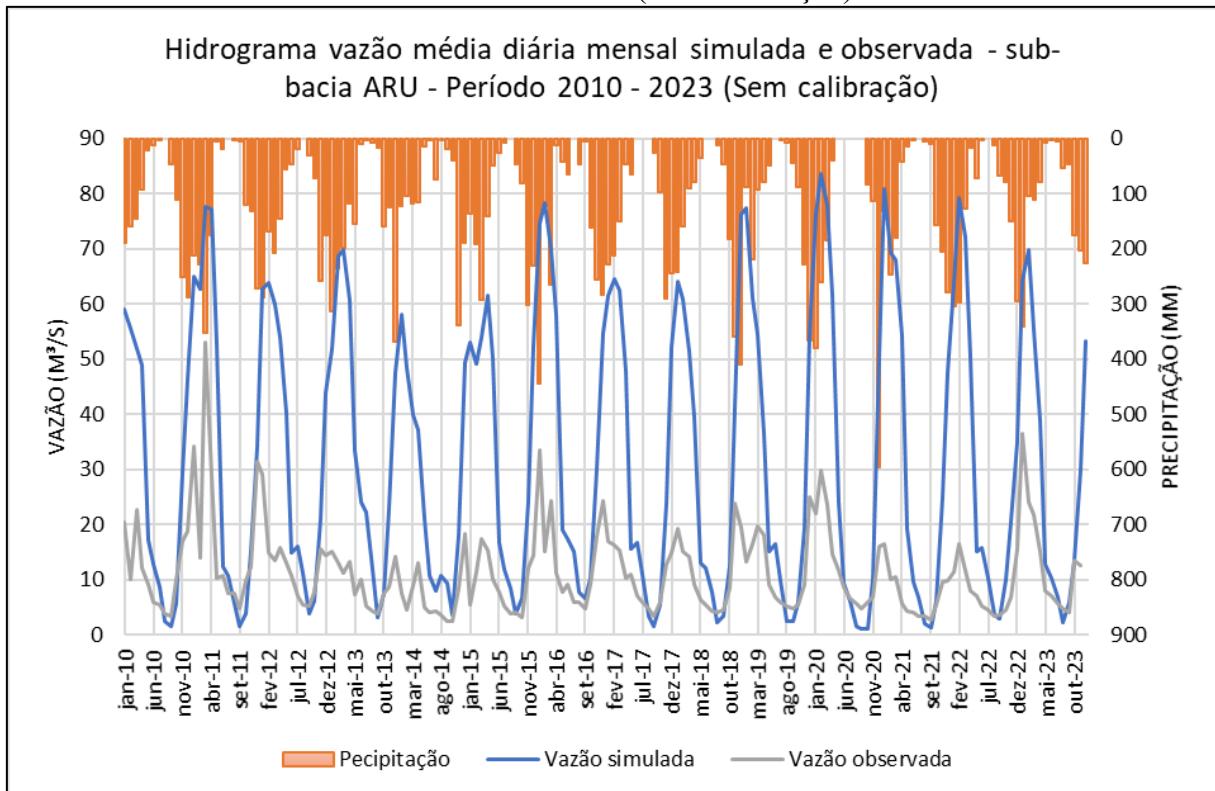
Para o caso desse trabalho, esse arquivo foi processado e organizado de forma a possibilitar a criação de gráficos temporais considerando os valores de vazões simulados em período mensal ao longo dos anos. Nas Figuras 33 e 34 estão ilustrados esses gráficos e também as precipitações monitoradas. Além disso, foram inseridos os valores de vazões medidos no Rio Uberabinha e os valores regionalizados para o Ribeirão Bom Jardim, para efeito de comparação com as vazões simuladas. Os gráficos apresentam o período de 01/01/2010 a 31/12/2023, sendo que o período de 2007 a 2009 foi utilizado como aquecimento do modelo.

Figura 33 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023 (Sem calibração)



Fonte: Autora, (2024).

Figura 34 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023 (Sem calibração)



Fonte: Autora, (2024).

Visualmente, observa-se que o SWAT+ não conseguiu simular as vazões de forma satisfatória sem a calibração. Verifica-se que os picos das vazões simuladas foram consideravelmente superiores que as vazões medidas ou regionalizadas, esse fenômeno é discutido por diversos autores que falaram da superestimativa das vazões na primeira simulação sem calibração, como Salles (2012), Fukunaga (2012) e Oliveira (2014).

Com os resultados obtidos, verifica-se que a necessidade de calibração do modelo é essencial para que os resultados possam ser mais adequados. A Tabela 8 demonstra os valores dos índices estatísticos encontrados para essa etapa, antecedendo a calibração. Para essa verificação considerou-se todo o período da simulação de 01/01/2010 a 31/12/2023, sendo comparadas as vazões obtidas nos exutórios das bacias com os dados observados na estação 60381000 ou com os valores de vazão regionalizados. Apesar dos resultados terem sido considerados como insatisfatórios, como dito anteriormente, são considerados normais na etapa que antecede a calibração.

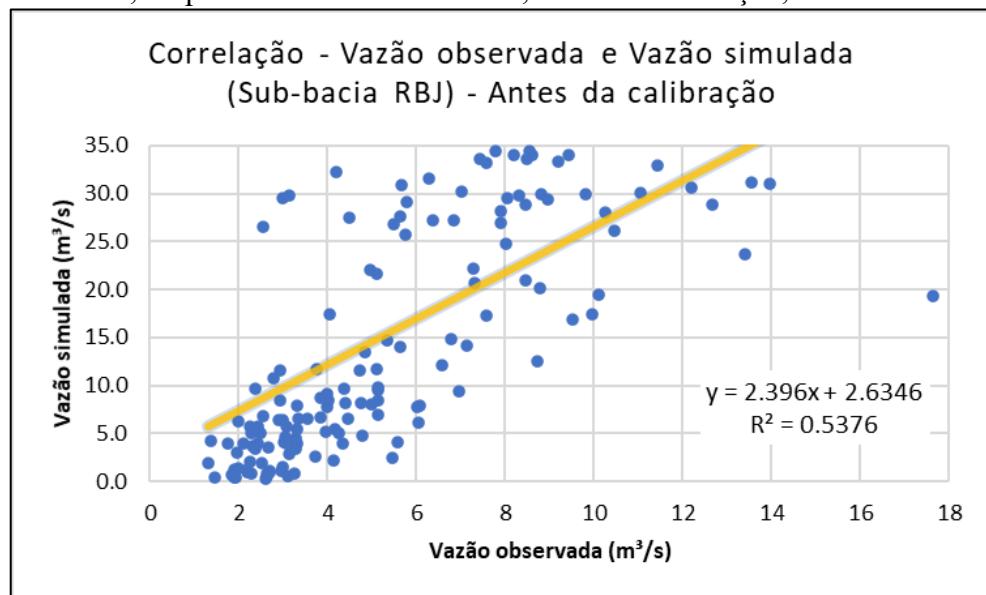
Tabela 8 – Resultado do índice de qualidade das simulações antes da calibração

Índices de qualidade das simulações antes da calibração				
Índice	Sigla	Valor obtido sub-bacia RBJ	Valor obtido sub-bacia ARU	Desempenhos para saídas de vazão
Coeficiente Nash e Sutcliffe	NSE	-12,71	-12,99	NSE > 0,80: Performance muito boa; 0,70 ≤ NSE ≤ 0,80: Performance boa; 0,50 ≤ NSE ≤ 0,70: Performance satisfatória; NSE ≤ 0,50: Performance não satisfatória; NSE < 0: O modelo é pior que usar a média observada como predição.
Percentual de Tendência	PBIAS	180,4	182,83	PBIAS < ±5%: Performance muito boa; ±5% < PBIAS < ±10%: Performance boa; ±10% < PBIAS < ±15%: Performance satisfatória; PBIAS ≥ ±15%: Ruim: Performance não satisfatória;
R ²	R ²	0,54	0,53	R ² > 0,85: Performance muito boa; 0,75 < R ² ≤ 0,85: Performance boa; 0,60 < R ² ≤ 0,75: Performance satisfatória; R² ≤ 0,60: Performance não satisfatória;

Fonte: Autora, (2025).

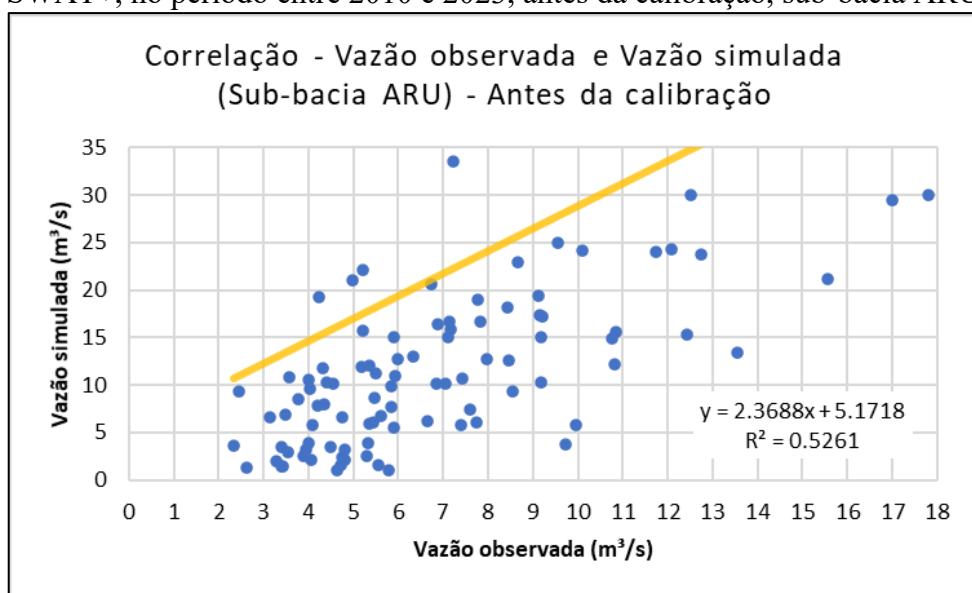
Os valores de NSE e PBIAS obtidos demonstram que ambos os parâmetros apresentam resultados distantes do valor ideal, sendo considerados como ruins. A correlação entre a vazão mensal simulada e a vazão mensal observada, apresentadas nas Figuras 35 e 36, também demonstraram que os resultados do modelo não foram satisfatórios nessa etapa inicial.

Figura 35 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, antes da calibração, sub-bacia RBJ



Fonte: Autora, (2025).

Figura 36 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, antes da calibração, sub-bacia ARU



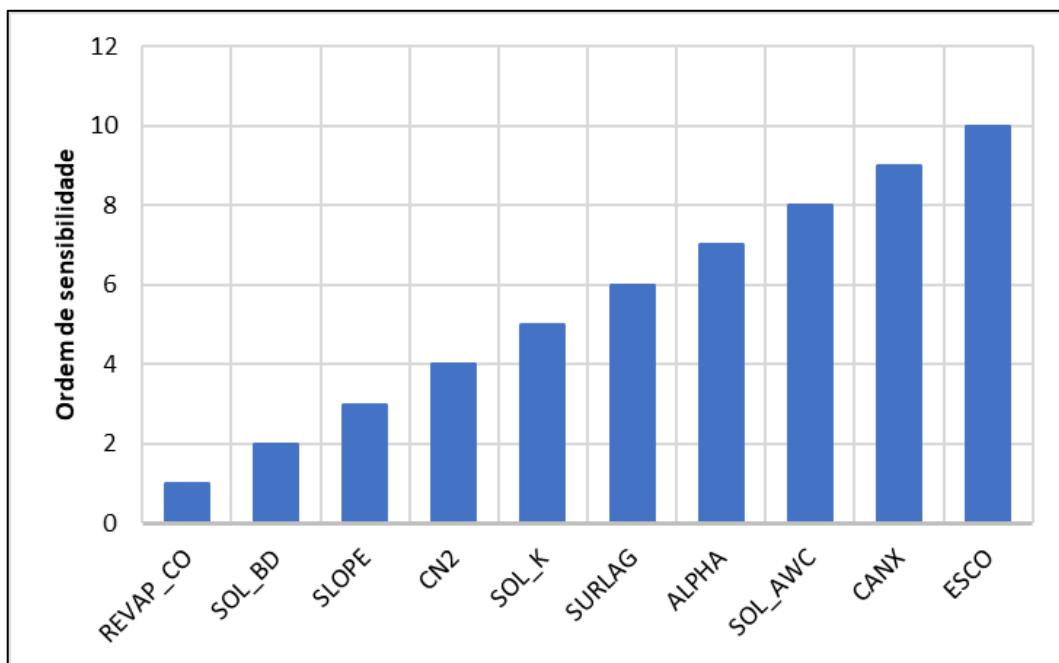
Fonte: Autora, (2025).

Sendo assim, a próxima etapa consiste na calibração dos parâmetros com o objetivo de melhorar a qualidade da simulação.

4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Após a realização das iterações da análise de sensibilidade, foram identificados os parâmetros com maior influência sobre as vazões simuladas (Figura 37). Para as duas sub-bacias foram obtidos os mesmos parâmetros que demonstraram maior sensibilidade a alterações no modelo. O gráfico representa um *ranking* em que é possível observar a importância dos parâmetros que mais influenciam na simulação de vazões, esses parâmetros foram obtidos pelo método *sobol*, descrito anteriormente. Os parâmetros mais sensíveis são os que possuem menores ordens de sensibilidade.

Figura 37 – Ranking da relevância de 10 parâmetros para calibração de vazão



Fonte: Autora, (2025).

Para montagem do gráfico foram desconsiderados os parâmetros inseridos no *software* que obtiveram ordens de sensibilidade iguais a zero, sendo eles EPCO e K_RES, que foram retirados da calibração por não se demonstrarem relevantes para essa etapa.

Dentre os parâmetros mais relevantes o REVAP_CO, que consiste no coeficiente de evaporação das áreas úmidas para o lençol freático, demonstrou-se como um parâmetro de alta sensibilidade na dinâmica de água na bacia. O parâmetro SOL_BD, relacionado a densidade aparente do solo, também se mostrou importante na ordem de sensibilidade. Parâmetros como CN2 e CANX também já foram tratados por diversos autores como parâmetros sensíveis em análises similares, por exemplo em trabalhos como Salles (2012), Oliveira (2014), Bonumá et. al. (2013), em que se sugere que o aumento do CN2 (Número da curva na condição II de umidade), implica no aumento do escoamento superficial.

A constante ALPHA, de recessão de escoamento de base, também se demonstrou como um dos mais sensíveis no modelo, mostrando que o comportamento do aquífero é significativo para as vazões simuladas e mostrando que como já mencionado por diversos autores os índices mais sensíveis para as bacias não variam tanto. Concluindo-se que os parâmetros mais sensíveis se repetem em diferentes modelos e bacias em conformidade com Salles (2012), Oliveira (2014), Brighenti et al., (2012).

4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A partir dos parâmetros mais relevantes do modelo, executou-se a calibração manual e automática das vazões utilizando os dados observados e os dados simulados. Para essa etapa foram feitas em média 80 calibrações utilizando o algoritmo DDS, as iterações foram sendo feitas até que se obtivessem os melhores valores para as funções objetivo NSE e PBIAS. Os parâmetros apresentados no Tabela 9 ilustram os valores finais após todos os ajustes.

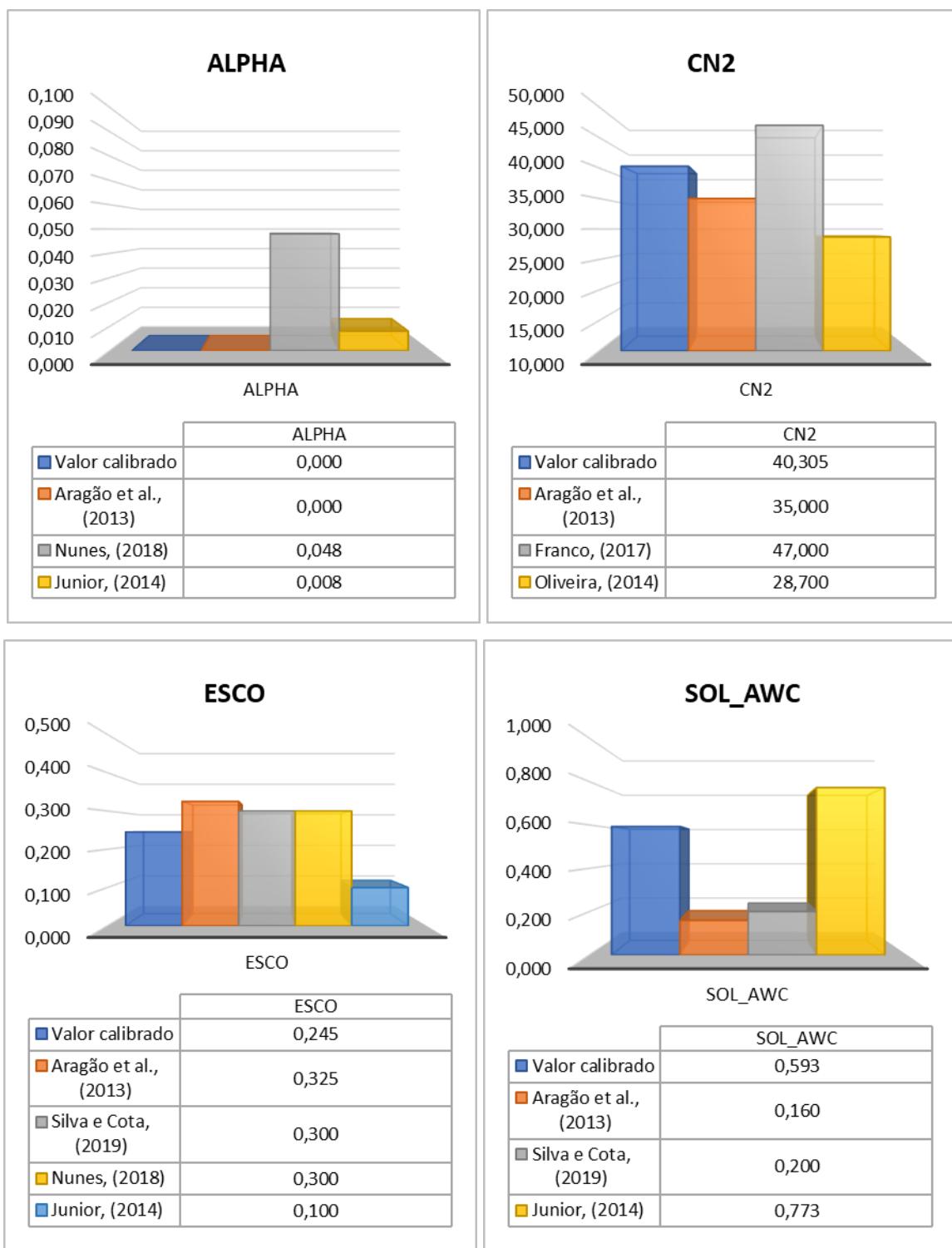
Tabela 9 - Valores dos parâmetros na calibração automática com os respectivos limites inferiores, superiores e o valor calibrado

Parâmetros	Descrição	Limite inferior	Limite superior	Método de variação	Valor na calibração
ALPHA	Constante de recessão do escoamento de base (dias)	0	1	Substituição direta	0
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adimensional)	35	95	Substituição direta	55,203
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0	1	Substituição direta	0,245
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O mm solo-1)	0,01	1	Substituição direta	0,593
REVAP_CO	Coeficiente de evaporação das áreas úmidas para o lençol freático (adimensional)	0,02	0,2	Substituição direta	0,081
SLOPE	Armazenamento máximo do dossel (mm)	0,0001	0,9	Substituição direta	0,578
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado (mm h ⁻¹)	0,0001	2000	Substituição direta	116,157
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)	0,05	24	Substituição direta	4,969
CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm)	0	100	Substituição direta	96,680
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)	0,9	2,5	Substituição direta	1,774

Fonte: Autora, (2025).

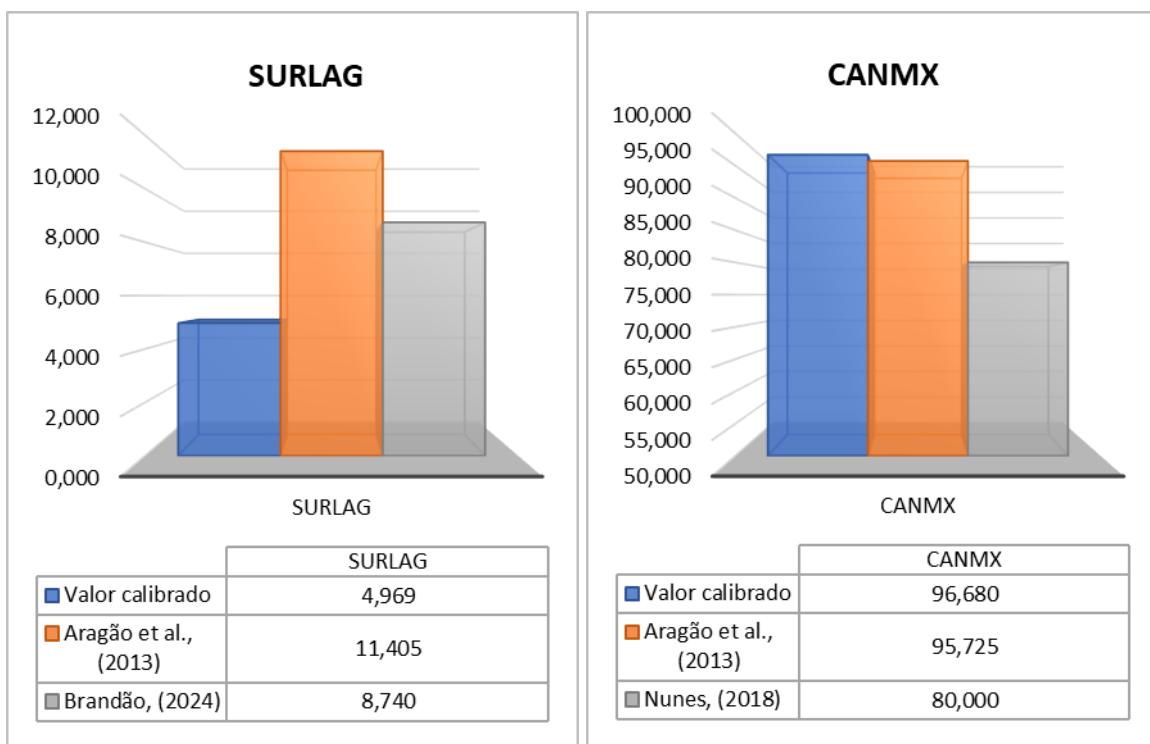
Com o objetivo de validar os valores dos parâmetros obtidos, mapeou-se os coeficientes calibrados por diversos autores que utilizaram o SWAT+ para modelagem hidrológica em bacias brasileiras. A partir dos valores obtidos nesses estudos foram construídos gráficos, como pode ser observado na Figura 38, que demonstram a comparação entre o valor calibrado nessa pesquisa e os valores obtidos por outros pesquisadores.

Figura 38 – Comparativo de parâmetros calibrados em modelagens de bacias brasileiras



Continua.

Figura 38 – Comparativo de parâmetros calibrados em modelagens de bacias brasileiras



Fonte: Autora, (2025).

Os gráficos apresentados na Figura 38 demonstram que a ordem de grandeza dos resultados obtidos na calibração é compatível com os valores encontrados por outros autores. Essa etapa é fundamental para a pesquisa, pois contribui para a validação dos resultados obtidos no *software Toolbox*, evidenciando a consistência da calibração efetuada. Vale ressaltar que, o objetivo não é que os parâmetros sejam calibrados com valores idênticos, visto que cada bacia tem sua particularidade de clima, solo, declividade e uso/ocupação, a ideia dessa etapa é tão somente validar as ordens de grandeza para os parâmetros calibrados em bacias nacionais.

Ainda a partir desses gráficos é possível verificar que os autores considerados para validação de cada parâmetro podem ser diferentes, isso porque cada autor determina, a partir da análise de sensibilidade, quais são os parâmetros mais sensíveis em suas simulações, e esses são os valores que são calibrados, podendo ser diferentes a depender das condições locais, físicas e climáticas de cada bacia. Nesta mesma análise, o *software Toolbox* apresentou para essa pesquisa quatro parâmetros em que não se verificou valores comparativos em estudos de outros autores, são eles, REVAP_CO, SLOPE, SOL_K, SOL_BD, apesar disso esses parâmetros não

foram retirados da simulação, uma vez que demonstraram sensibilidade significativa nos resultados obtidos.

Com base nos parâmetros calibrados, calculou-se critérios estatísticos de avaliação apresentados na Tabela 10. Os índices obtidos também demonstram um desempenho satisfatório quando comparados à simulação sem calibração. A Tabela 10 demonstra os resultados específicos para o período de calibração.

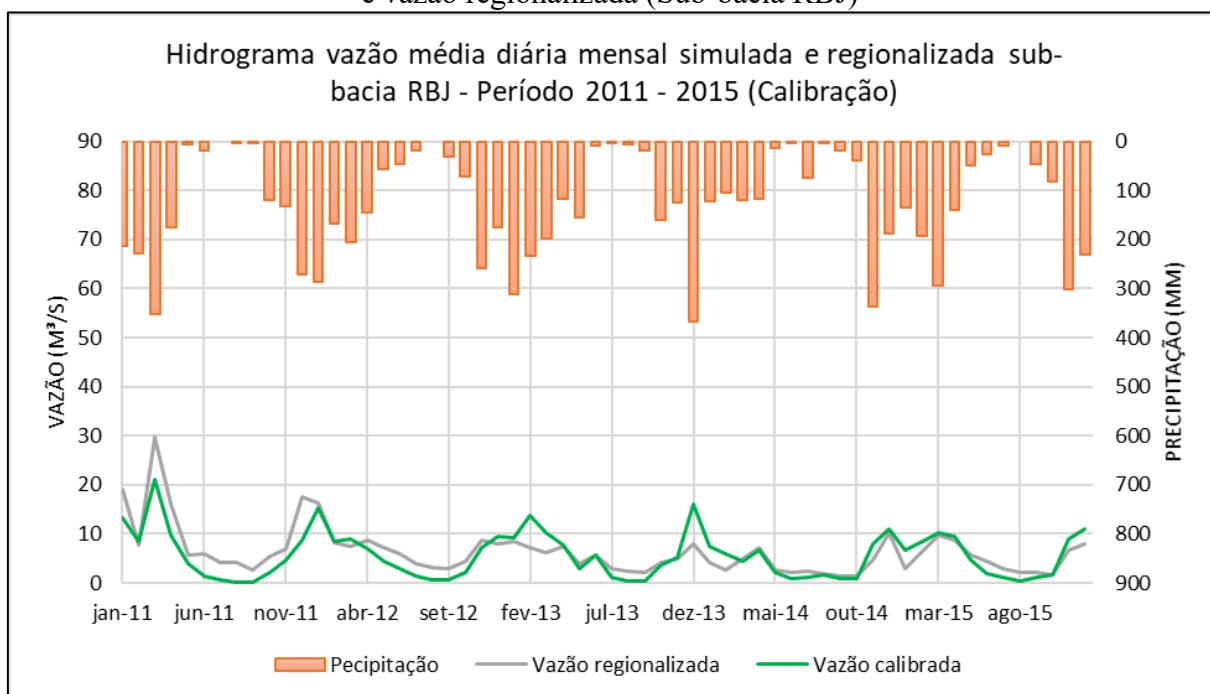
Tabela 10 - Resultado do índice de qualidade das simulações para o período de calibração

Índices de qualidade das simulações após a calibração (Período calibrado 2010 - 2015)				
Índice	Sigla	Valor obtido sub-bacia RBJ	Valor obtido sub-bacia ARU	Performance
Coeficiente Nash e Sutcliffe	NSE	0,60	0,60	<p>NSE > 0,80: Performance muito boa; $0,70 \leq NSE \leq 0,80$: Performance boa; $0,50 \leq NSE \leq 0,70$: Performance satisfatória; $NSE \leq 0,50$: Performance não satisfatória; $NSE < 0$: O modelo é pior que usar a média observada como predição.</p>
Percentual de Tendência	PBIAS	-12,22	-12,89	<p>PBIAS < $\pm 5\%$: Performance muito boa; $\pm 5\% < PBIAS < \pm 10\%$: Performance boa; $\pm 10\% < PBIAS < \pm 15\%$: Performance satisfatória; $PBIAS \geq \pm 15\%$: Ruim: Performance não satisfatória;</p>

Fonte: Autora, (2025).

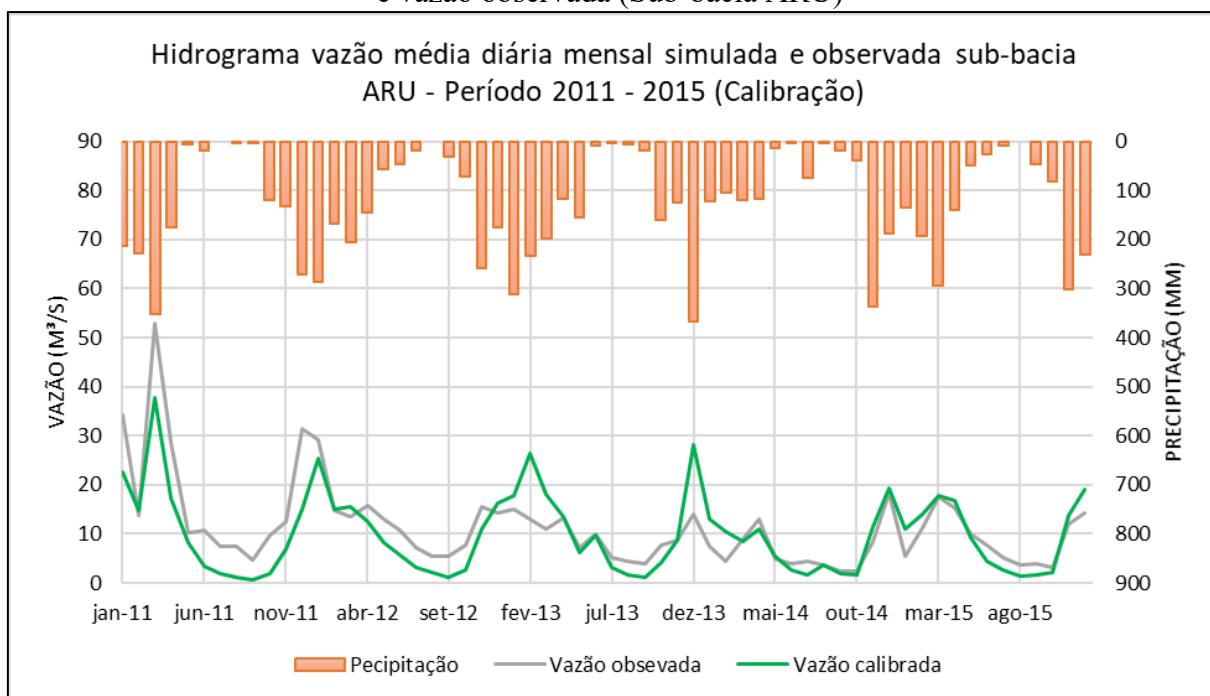
Nas Figuras 38 e 39 é possível observar que os resultados de vazão média mensal após a calibração apresentaram performances satisfatórias, confirmando os índices estatísticos obtidos, se comparados aos gráficos das Figuras 33 e 34. Apesar da performance satisfatória de ajuste dos modelos, observa-se uma continuação da tendência de superestimar algumas vazões máximas e subestimar vazões mínimas. Para o período de calibração e validação foram elaboradas as curvas de permanência como forma de avaliar a relação de superestimação e subestimação entre os períodos observados e simulados.

Figura 38 – Hidrograma de vazões após processo de calibração, considerando vazão calibrada e vazão regionalizada (Sub-bacia RBJ)



Fonte: Autora, (2025).

Figura 39 – Hidrograma de vazões após processo de calibração, considerando vazão calibrada e vazão observada (Sub-bacia ARU)

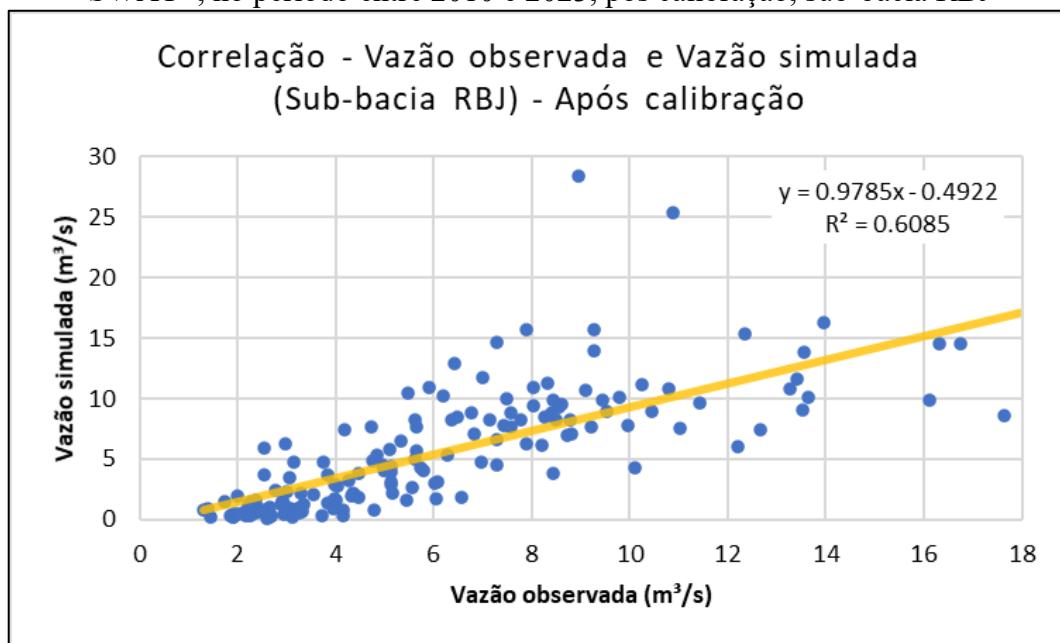


Fonte: Autora, (2025).

4.7 VALIDAÇÃO

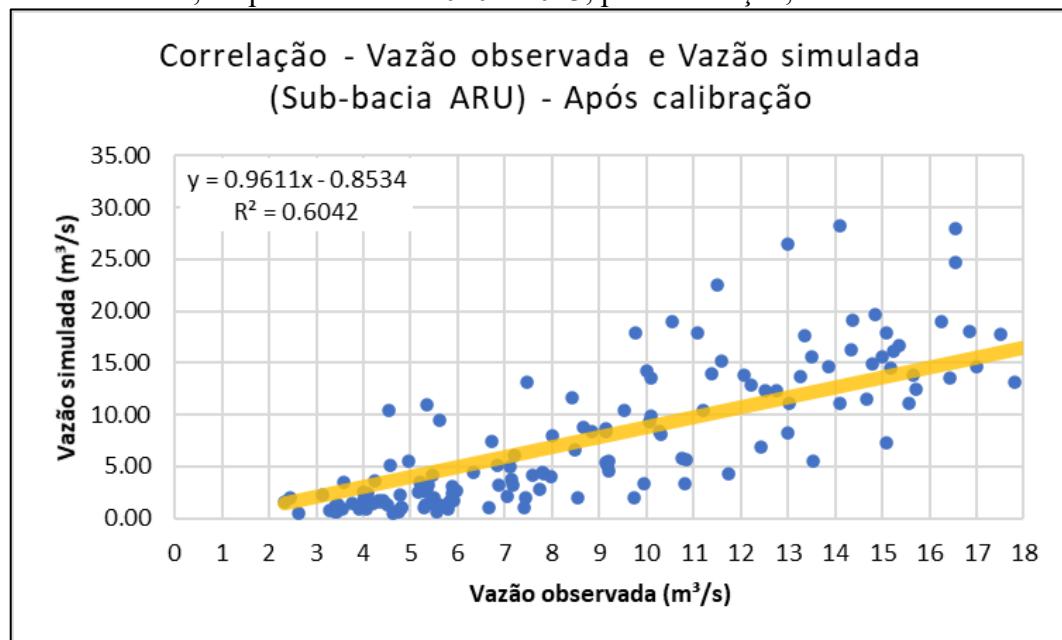
Após a inserção dos parâmetros calibrados no SWAT *editor*, foram gerados os gráficos do período completo 01/01/2010 a 31/12/2023 para a validação dos modelos. Nas Figuras 40 e 41 observa-se o gráfico de dispersão para todo o período de calibração e validação dos modelos para as sub-bacias. Nota-se que nesses gráficos é possível verificar melhoria dos modelos, ainda que em alguns casos ainda se observe superestimativas. Nos gráficos de dispersão observou-se uma melhoria do R^2 para sub-bacia RBJ de 0,54 para 0,61 e para sub-bacia ARU de 0,53 para 0,60. Ainda, observa-se que a linha de tendência ficou mais próxima da proporção 1:1, demonstrando um melhor ajuste do modelo.

Figura 40 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, pós calibração, sub-bacia RBJ



Fonte: Autora, (2025).

Figura 41 - Correlação entre a vazão média mensal observada e simulada pelo modelo SWAT+, no período entre 2010 e 2023, pós calibração, sub-bacia ARU



Fonte: Autora, (2025).

Na Tabela 11, estão demonstrados os valores obtidos dos índices estatísticos na avaliação da capacidade do modelo de simular vazões de outro período para o qual não foi calibrado. Para o período de calibração e validação, observa-se que o índice NSE apresentou uma piora, em ambas simulações, demonstrando uma performance não satisfatória para esse período. Porém, apesar do NSE não atingir um valor satisfatório, os demais coeficientes PBIAS e R^2 e a coerência dos parâmetros calibrados se demonstram como satisfatórios para a simulação, demonstrando a confiabilidade do modelo.

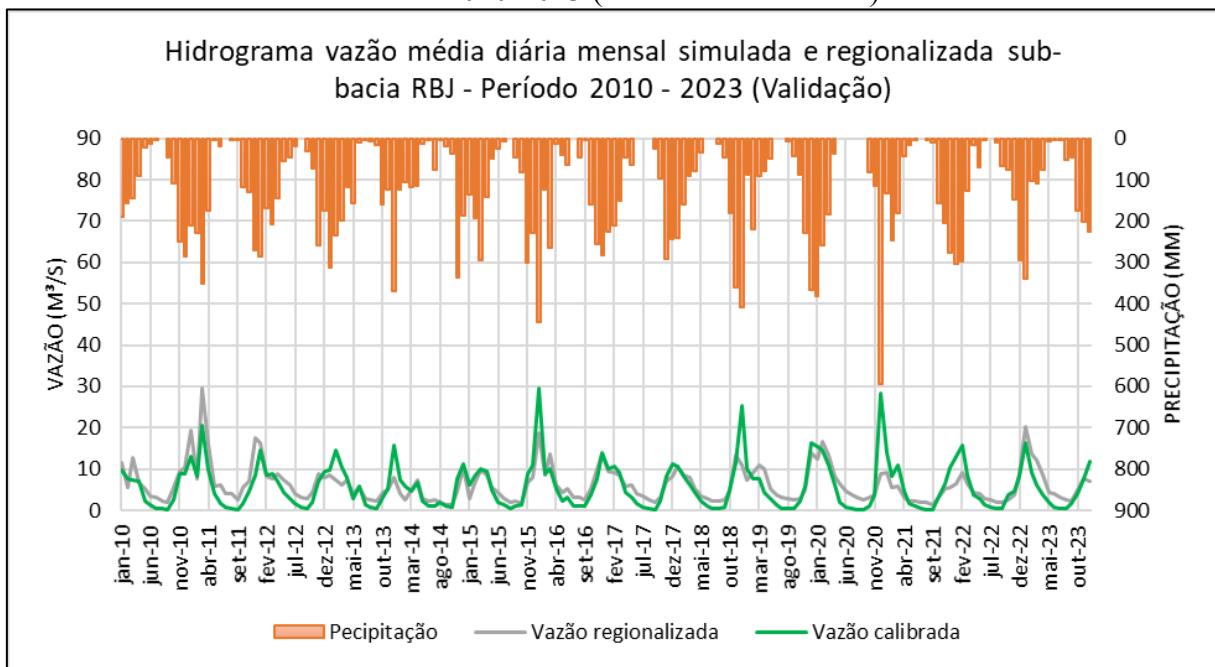
Tabela 11 - Resultado do índice de qualidade das simulações após a calibração e a validação

Índices de qualidade das simulações após a calibração (Período calibrado e validação 2010 - 2023)				
Índice	Sigla	Valor obtido sub-bacia RBJ	Valor obtido sub-bacia ARU	Performance
Coeficiente Nash e Sutcliffe	NSE	0,37	0,36	NSE > 0,80: Performance muito boa; 0,70 ≤ NSE ≤ 0,80: Performance boa; 0,50 ≤ NSE ≤ 0,70: Performance satisfatória; NSE ≤ 0,50: Performance não satisfatória; NSE < 0: O modelo é pior que usar a média observada como predição.
Percentual de Tendência	PBIAS	-10,48	-11,47	PBIAS < ±5%: Performance muito boa; ±5% < PBIAS < ±10%: Performance boa; ±10% < PBIAS < ±15%: Performance satisfatória; PBIAS ≥ ±15%: Ruim: Performance não satisfatória;
R ²	R ²	0,61	0,60	R ² > 0,85: Performance muito boa; 0,75 < R ² ≤ 0,85: Performance boa; 0,60 < R² ≤ 0,75: Performance satisfatória; R ² ≤ 0,60: Performance não satisfatória;

Fonte: Autora, (2025).

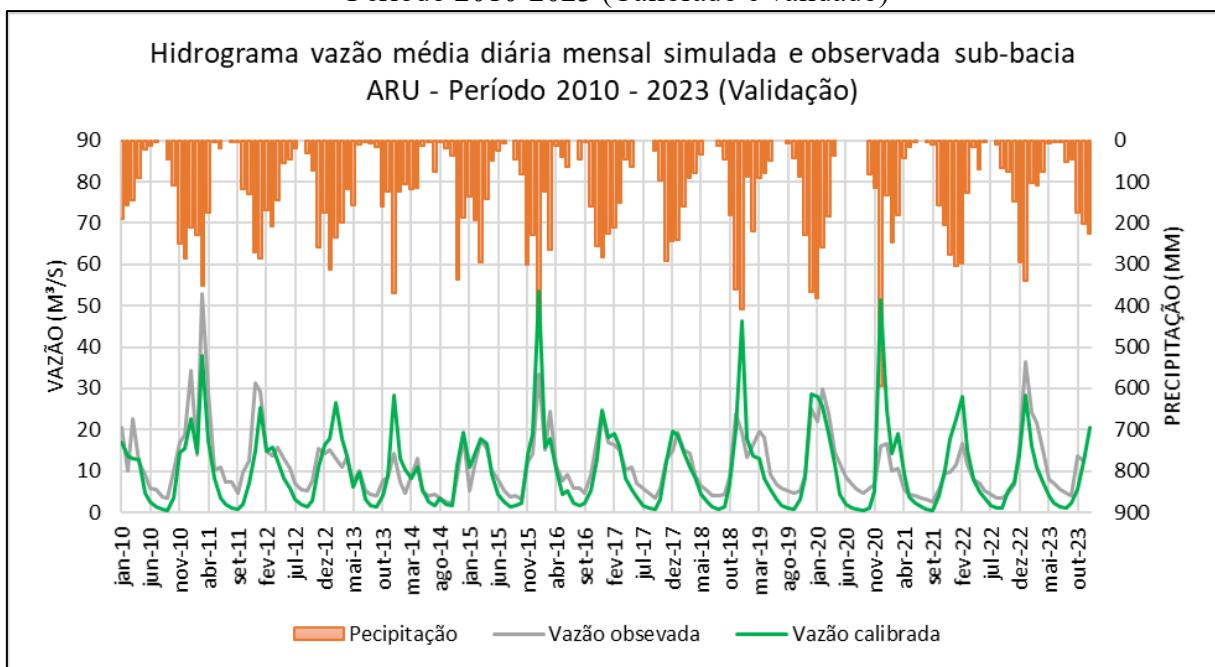
As Figuras 42 e 43 apresentam o gráfico com o período calibrado e período de validação. Considerando uma análise gráfica, uma avaliação dos índices estatísticos, e ainda que no período de validação não é permitido alteração de parâmetros que foram ajustados com o SWAT Toolbox, é possível afirmar que o SWAT+ obteve um resultado satisfatório para a simulação de vazões.

Figura 42 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023 (Calibrado e validado)



Fonte: Autora, (2025).

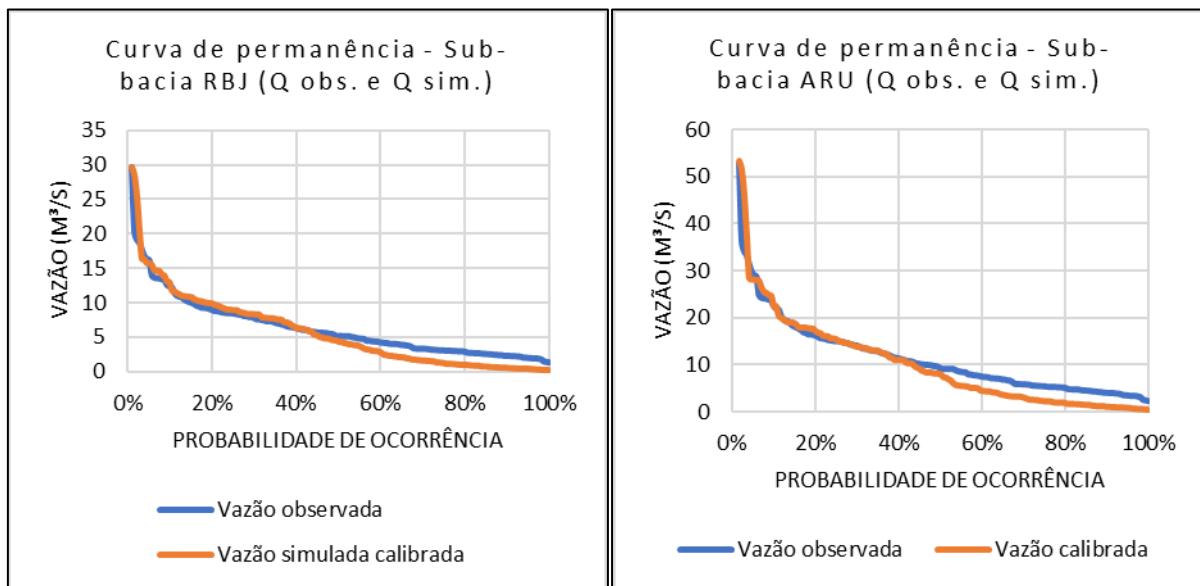
Figura 43 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023 (Calibrado e validado)



Fonte: Autora, (2025).

Verificando o período completo (calibração + validação), nota-se pelas Figuras 42 e 43 que assim como indicado pelo índice PBIAS, que obteve resultado negativo, demonstrou-se que pode ocorrer subestimação dos valores de vazão nos períodos de estiagem. Para avaliar essa relação de subestimativa entre os períodos observados e simulados, foram elaboradas curvas de permanência para as duas sub-bacias (Figura 44).

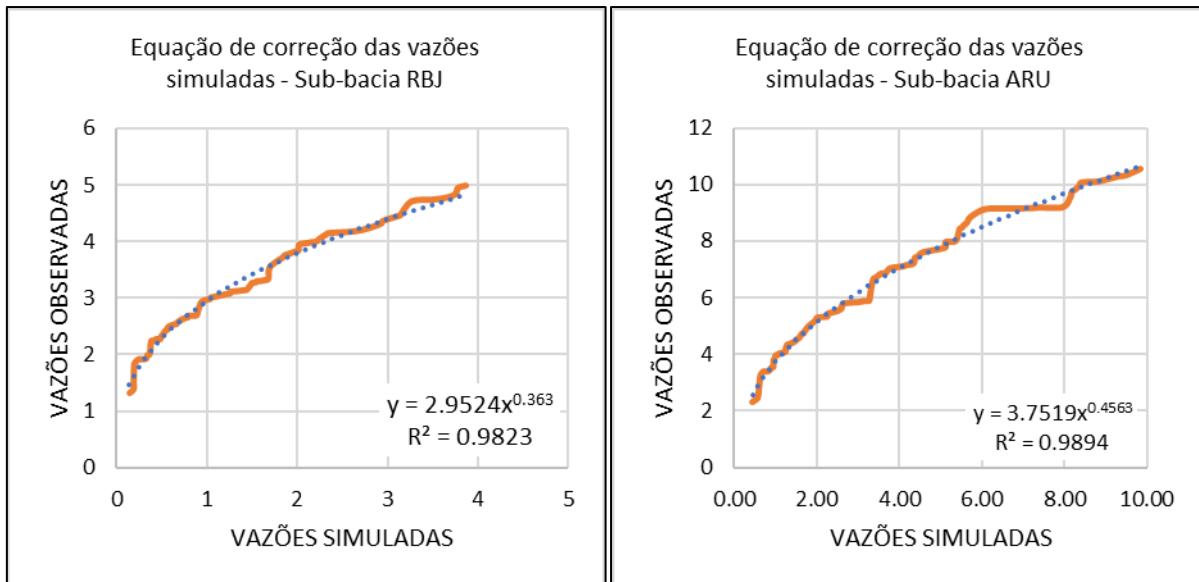
Figura 44 – Curvas de permanência no período de calibração e validação (Sub-bacia RBJ e Sub-bacia ARU)



Fonte: Autora, (2025).

As curvas de permanência geradas mostram como a simulação tende a subestimar as vazões médias abaixo de 5 m^3/s para a sub-bacia RBJ e 10 m^3/s para a sub-bacia ARU, de forma quase uniforme. Visando a correção das vazões simuladas, as vazões que foram subestimadas foram confrontadas conforme o gráfico da Figura 44, a fim de obter a equação de correção determinada pela linha de tendência que apresente o melhor ajuste entre os pontos plotados.

Figura 44 – Determinação das equações de correção das vazões simuladas



Fonte: Autora, (2025).

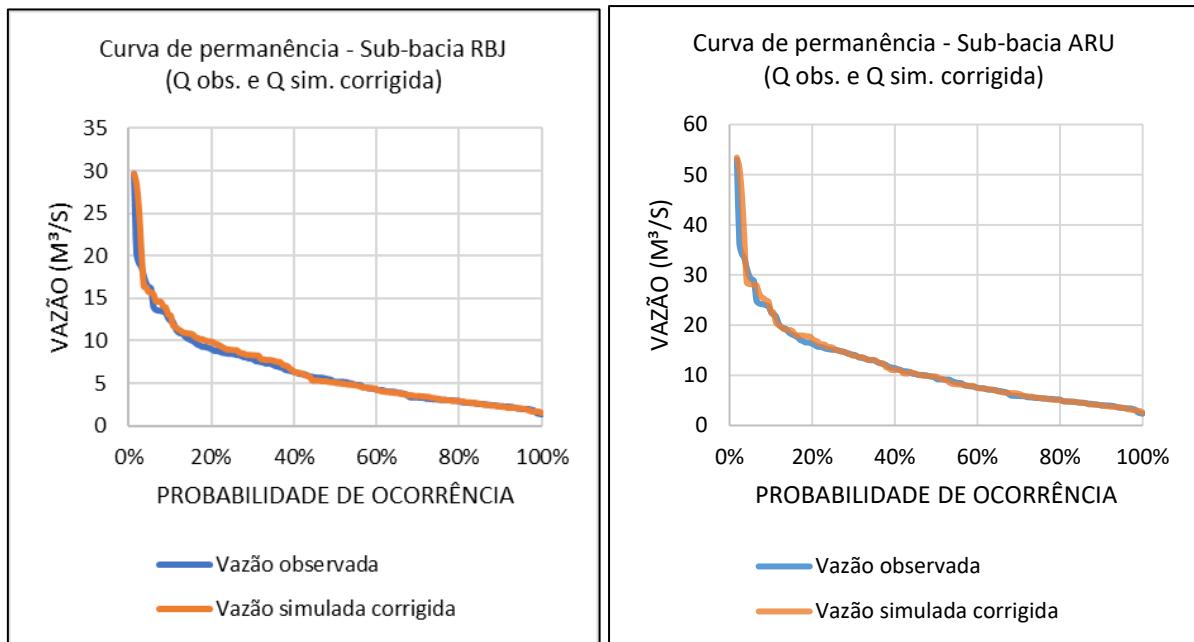
As linhas de tendência com melhor ajuste aos pontos do gráfico foram geradas por meio de equações potenciais (Equação 5 e Equação 6), as quais obtiveram valores de R^2 muito próximos de 1, sendo então adotadas como equações de correções para as vazões a serem simuladas nos cenários.

$$Q_{corrig.} = 2,9524 \times Q_{sim}^{0,363} \quad \text{Equação 5}$$

$$Q_{corrig.} = 3,7519 \times Q_{sim}^{0,4563} \quad \text{Equação 6}$$

Em que $Q_{corrig.}$ é a vazão corrigida a ser utilizada para os valores de vazão menores que 5 e 10 m³/s para as sub-bacias RBJ e ARU, respectivamente e Q_{sim} é a vazão simulada diretamente pelo modelo. A fim de demonstrar a eficiência, a Figura 45 demonstra as novas curvas de permanência após a correção dos valores que foram subestimados.

Figura 45 – Curvas de permanência para as vazões observadas e vazões simuladas corrigidas



Fonte: Autora, (2025).

As equações obtidas serão utilizadas na correção das vazões em cada um dos cenários. Outrossim, como vários autores brasileiros já confirmaram (Oliveira, 2014), (Junior, 2014), (Salles, 2012), o modelo SWAT possui grande potencial para ser utilizado no Brasil, sendo importante o cuidado com a análise e a calibração adequada do modelo, que se demonstra indispensável para a obtenção de bons resultados.

4.8 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

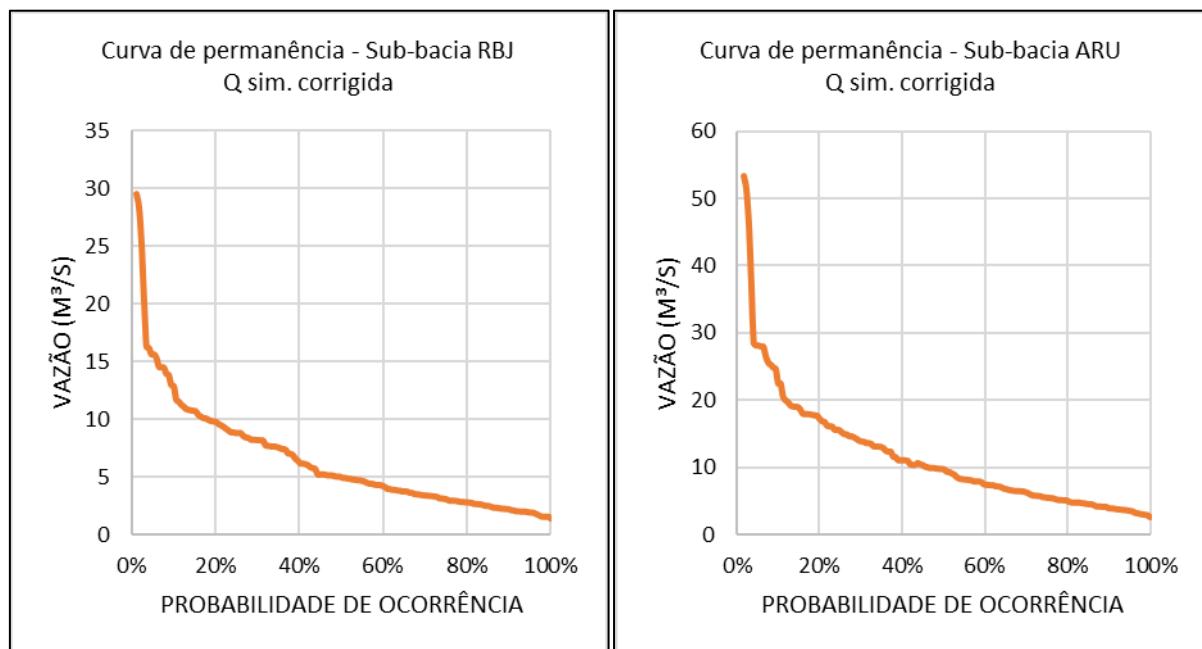
Com o modelo calibrado e a equação de correção estabelecida, os cenários propostos foram simulados utilizando a referência da vazão Q90, que corresponde ao valor excedido em 90% do período considerado na construção da curva. Seguindo a metodologia adotada, as vazões analisadas nesta fase foram obtidas a partir das saídas da sub-bacia do exutório.

4.8.1 Cenário Atual (Cenário 0)

O Cenário Atual no SWAT, também chamado de Cenário 0, considera a série de vazões médias mensais obtidas no período de 01/01/2010 a 31/12/2023. A partir da série calibrada e com a

equação corrigida, elaborou-se as curvas de permanência de cada sub-bacia, as curvas servirão como referências para os demais cenários simulados (Figura 46).

Figura 46 – Curva de permanência do Cenário Atual para as sub-bacias



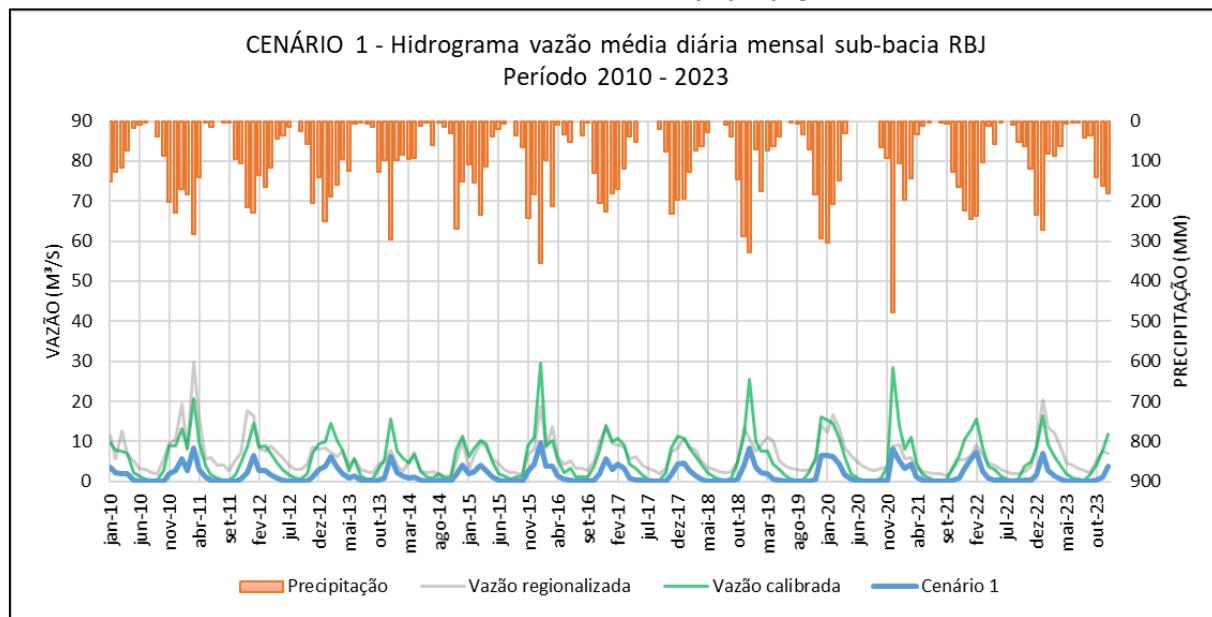
Fonte: Autora, (2025).

Considerando os gráficos das curvas de permanência, obteve-se os valores de Q90 para cada uma das sub-bacias, os valores encontrados foram 2,27 m³/s para a sub-bacia RBJ e 3,94 m³/s para a sub-bacia ARU.

4.8.2 Cenário de redução de precipitação (Cenário I)

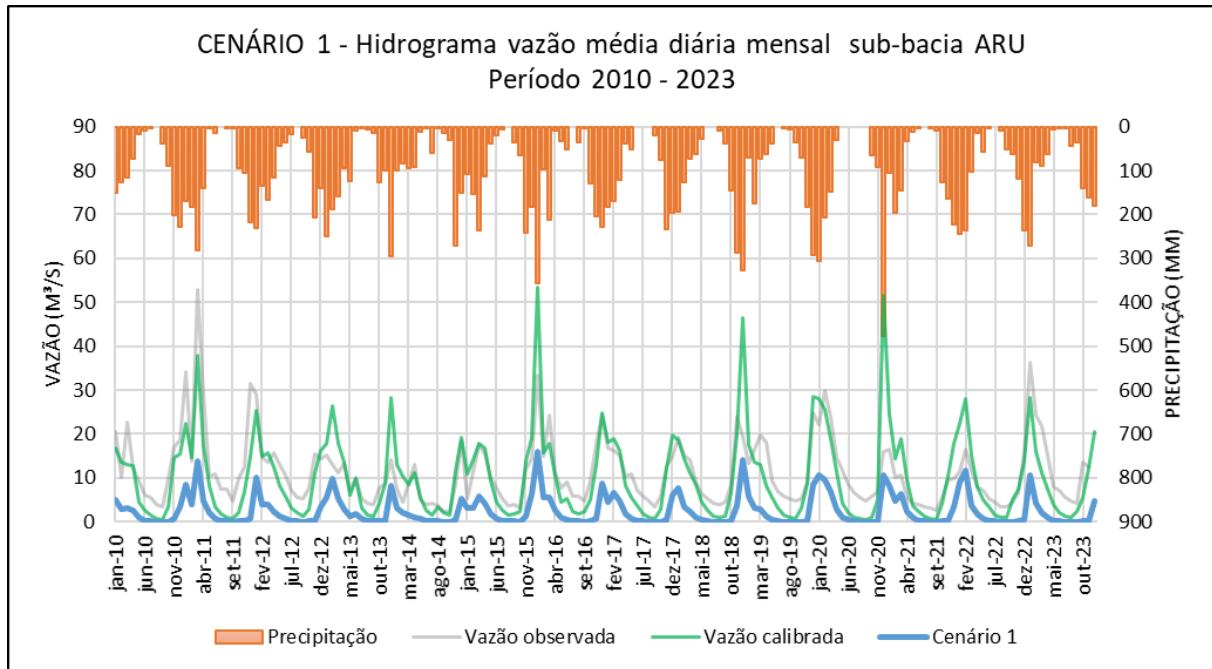
Os resultados obtidos a partir da simulação de redução de 20% da precipitação durante 17 anos evidenciaram grande impactos sobre as vazões nos rios. A partir das Figura 47 e 48 é possível observar que ocorreu uma redução geral do volume escoado, principalmente nos períodos de estiagem em que se obteve vazões próximas de zero no exutório.

Figura 47 - Cenário 1 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ - Período 2010-2023



Fonte: Autora, (2025).

Figura 48 - Cenário 1 - Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU - Período 2010-2023

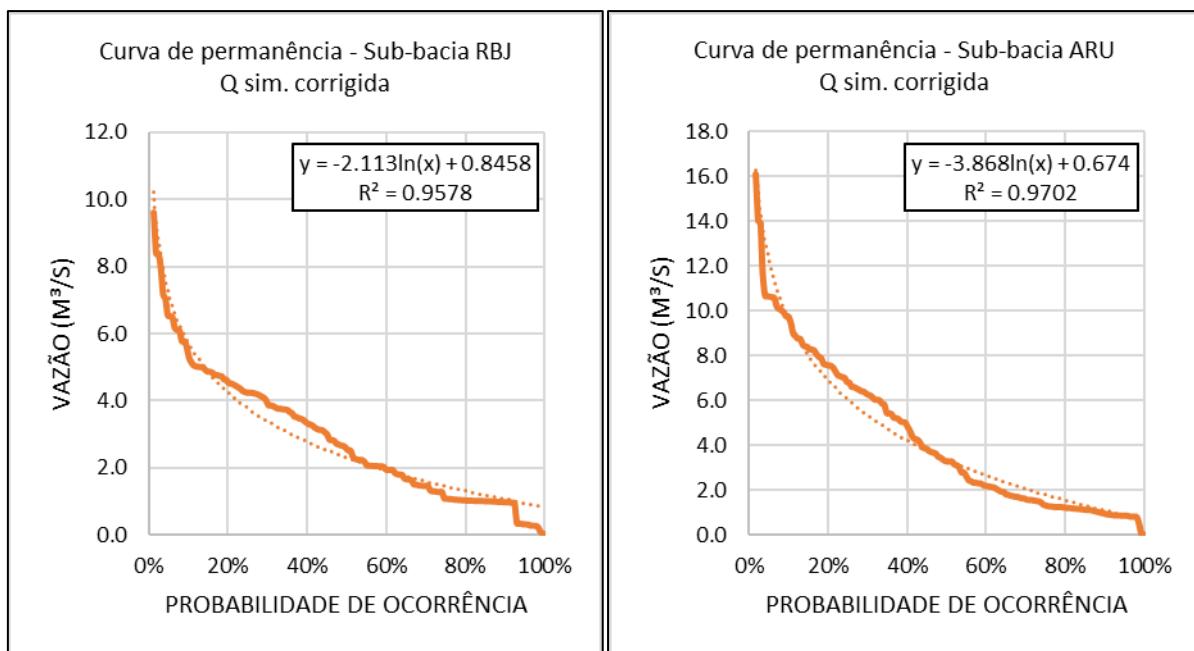


Fonte: Autora, (2025).

A partir desse cenário foi possível identificar que os períodos de seca se tornaram ainda mais críticos na simulação, demonstrando baixa recarga dos aquíferos e menor disponibilidade de

água no solo, comprometendo inclusive a sustentabilidade hídrica da região ao longo do tempo. Para os períodos úmidos observou-se vazões reduzidas nas bacias. A partir da Figura 49 observa-se uma diminuição, como esperado, da Q90 para as duas sub-bacias, 1,06 m³/s para sub-bacia RBJ e 1,08 m³/s para sub-bacia ARU.

Figura 49 - Curva de permanência do Cenário 1 para as sub-bacias



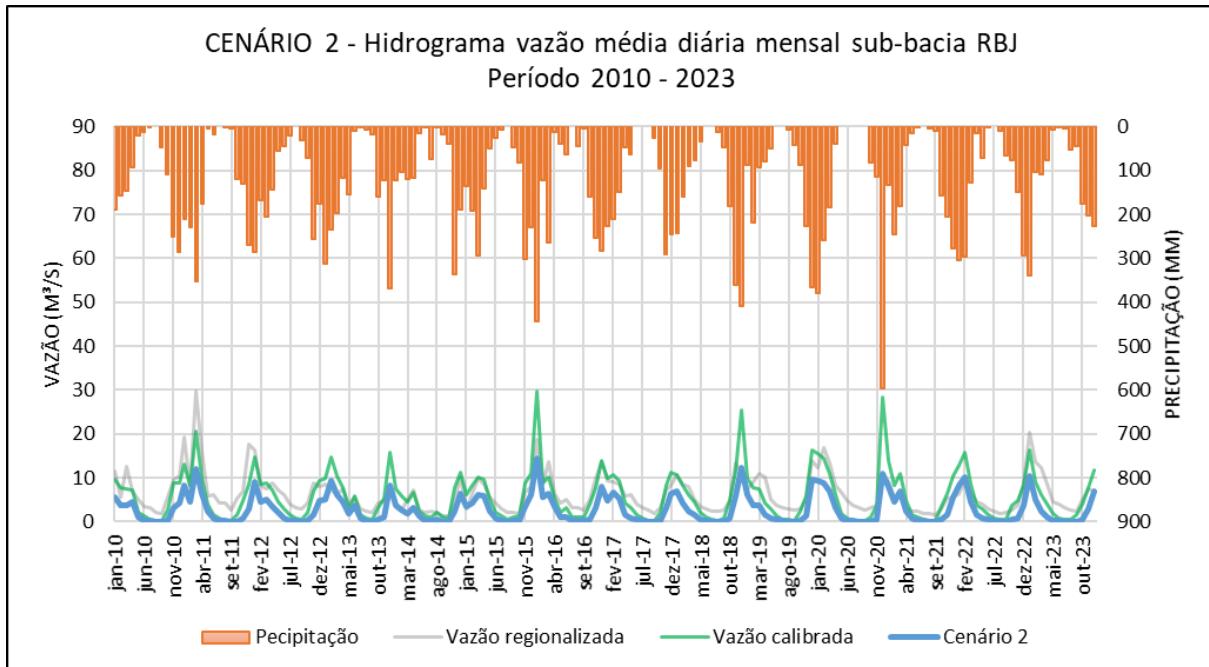
Fonte: Autora, (2025).

Para esse cenário a tendência geral de redução de vazão se mostrou bem representada pelo programa, confirmando a sensibilidade do modelo às mudanças climáticas.

4.8.3 Cenário de alteração no uso do solo (Cenário 2)

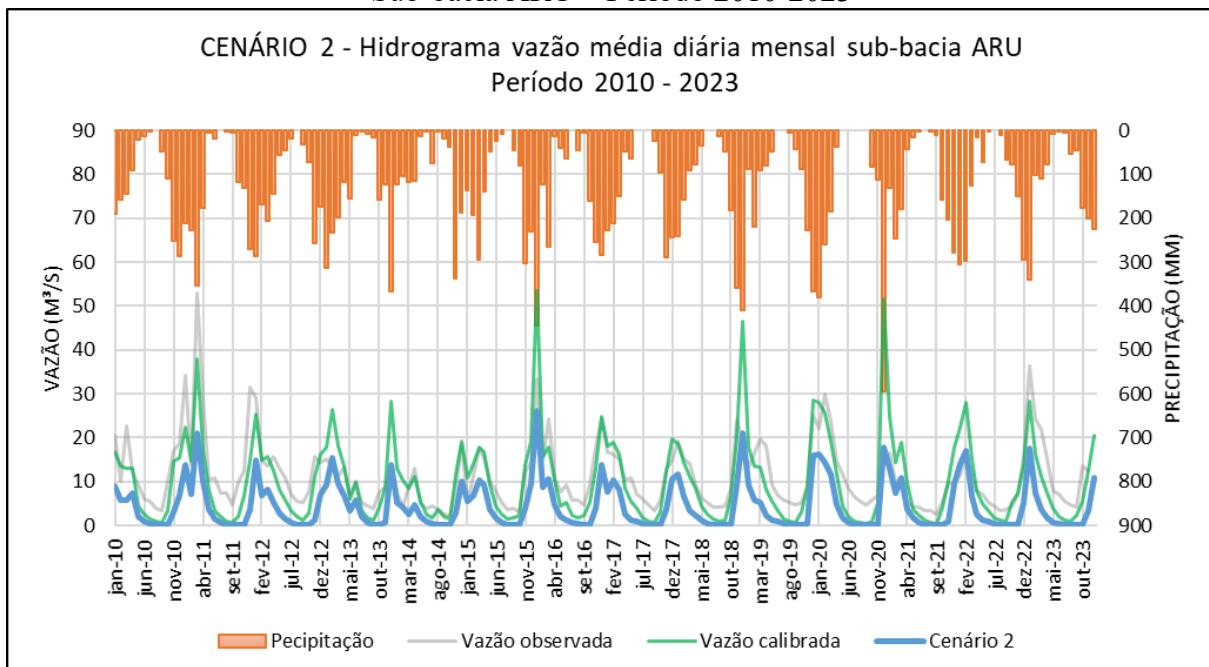
A simulação realizada para esse cenário propôs, como demonstrado na metodologia, uma alteração de ocupação das sub-bacias para formação florestal equivalente a 72,41% para a sub-bacia RBJ e 69,64% para a sub-bacia ARU. Essa alteração revelou mudanças significativas no comportamento hidrológico das regiões. Como demonstrado nas Figuras 50 e 51 observa-se uma redução na intensidade dos picos de vazão, o que demonstra um aumento da infiltração, um maior escoamento de base e também a diminuição do escoamento superficial. A alteração na dinâmica de uso da bacia demonstra uma maior capacidade da vegetação em reter e infiltrar a água, o que ao longo do tempo poderia demonstrar uma regularização do fluxo hídrico.

Figura 50 – Cenário 2 – Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia RBJ – Período 2010-2023



Fonte: Autora, (2025).

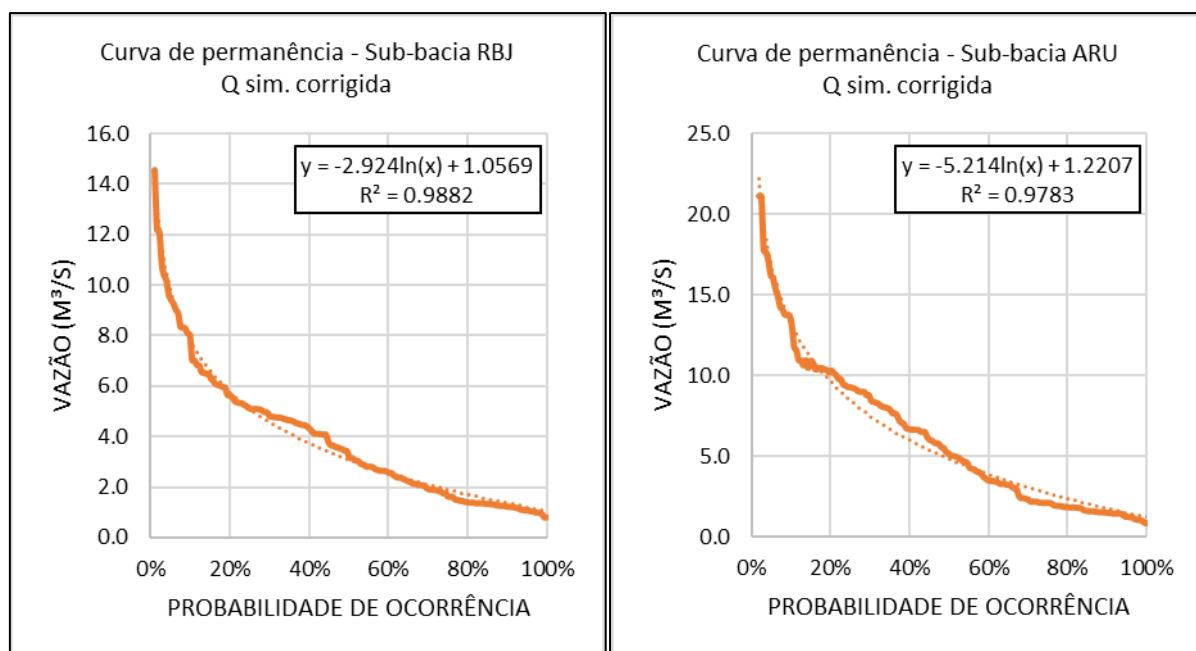
Figura 51 – Cenário 2 – Hidrograma vazão média mensal simulada e regionalizada para a Sub-bacia ARU – Período 2010-2023



Fonte: Autora, (2025).

Entretanto, ainda que o uso do solo sugira uma melhor estabilidade do ciclo hidrológico, favorecida pela ocupação florestal, observa-se que a vazão Q90 diminuiu nesse cenário para as duas sub-bacias. Na Figura 52 é possível verificar que as vazões obtidas na curva de permanência foram 1,37 m³/s para a sub-bacia RBJ e 1,78 m³/s para a sub-bacia ARU.

Figura 52 - Curva de permanência do Cenário 2 para as sub-bacias



Fonte: Autora, (2025).

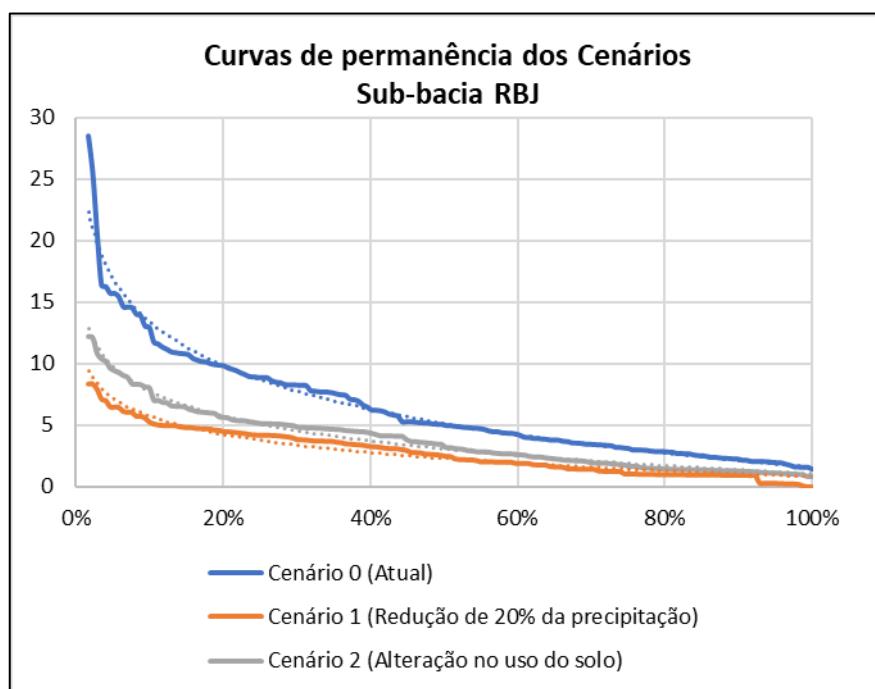
Há de se observar ainda que os cenários são simulados a partir dos parâmetros calibrados e validados, sendo assim uma alteração de uso do solo pode resultar em inconsistências com os parâmetros que foram previamente ajustados. Ainda, durante a calibração do modelo, identificou-se uma tendência de subestimativa para as vazões mínimas principalmente durante os períodos de estiagem que se demonstraram ainda mais baixas do que quando simuladas no Cenário 0.

Diante disso, apesar do modelo captar de forma adequada a tendência de redução dos picos e demonstrar aumento da vazão de base, os resultados demonstram que apenas a vazão que sai da bacia, não pode ser o único critério avaliado nas alterações de uso do solo, como já demonstrado por Oliveira, (2014).

4.8.4 Análise Comparativa dos Cenários e Disponibilidade Hídrica das Sub-bacias

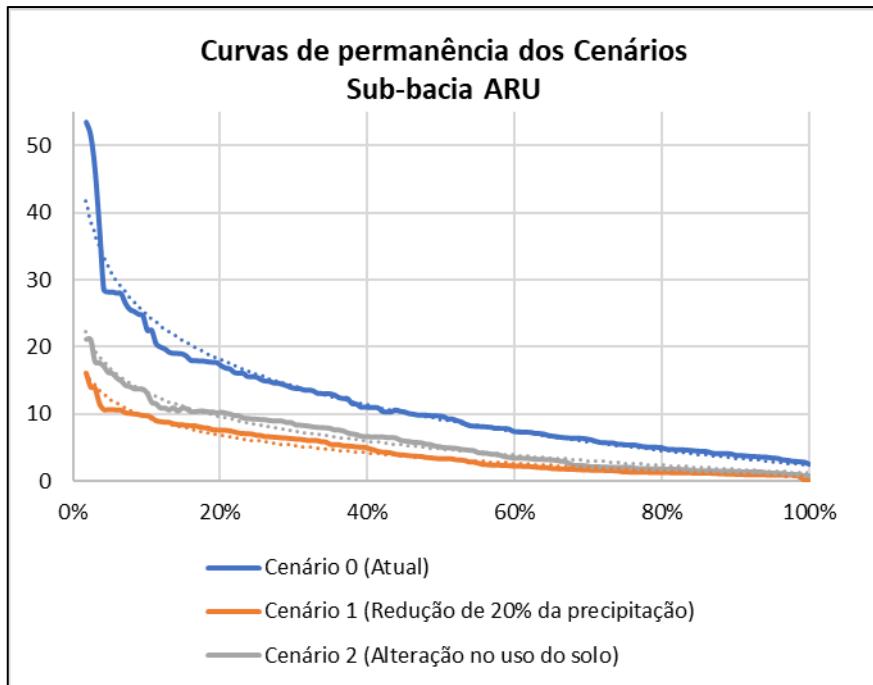
Realizando uma comparação entre os cenários desenvolvidos para as duas sub-bacias, as curvas de permanência foram plotadas, conforme ilustrado nas Figuras 53 e 54. É importante destacar que os cenários simulados não se tratam de previsões, mas de uma análise do comportamento da bacia frente às alterações na modificação das condições locais.

Figura 53 - Curvas de permanência - Cenários - Sub-bacia RBJ



Fonte: Autora, (2025).

Figura 54 - Curvas de permanência - Cenários - Sub-bacia ARU



Fonte: Autora, (2025).

Nessa pesquisa, a disponibilidade hídrica encontrada para as sub-bacias no Cenário 0, considerando a Q₉₀, foi de 2,27 m³/s para RBJ e 3,84 m³/s para ARU. A Tabela 12 demonstra a comparação entre as vazões médias, mínimas (Q₉₀), e máximas obtidas para os cenários.

Tabela 12 – Análise comparativa dos cenários – Vazões máximas, médias e mínimas

Análise comparativa dos cenários considerando as vazões máximas, médias e mínimas simuladas				
Sub-bacia	Cenários	Vazão média (m ³ /s)	Vazão mínima - Q90 (m ³ /s)	Vazão máxima (m ³ /s)
RBJ	0	6,53	2,27	29,59
	1	2,86	1,06	10,22
	2	3,84	1,37	14,03
ARU	0	11,52	3,94	53,42
	1	4,28	1,08	16,10
	2	6,07	1,78	22,18

Fonte: Autora, (2025).

Ao comparar a curva de permanência do Cenário 1 com o Cenário 0, é possível verificar que a redução da precipitação, conforme proposto, traz uma diminuição da disponibilidade hídrica de

53,30% na sub-bacia RBJ e 72,59% na sub-bacia ARU. Isso sugere que em boa parte do ano a bacia enfrentaria problemas de escassez caso ocorra uma redução de precipitação.

Para o cenário 2, esperava-se que a alteração para formação florestal, como principal uso do solo para as bacias, aumentasse a disponibilidade hídrica, porém como pode ser observado nas curvas de permanência as vazões diminuíram, tendo sido observado decréscimos de 39,65% para a sub-bacia RBJ e 54,82% para a sub-bacia ARU em relação ao Cenário Atual. De acordo com estudos de outros autores, como descrito por Balbinot et al (2008), essa resposta pode estar associada ao aumento da infiltração e ao aumento do escoamento de base, combinado com a diminuição do escoamento superficial.

Segundo Balbinot et al. (2008), um fato que por muitas vezes era mistificado na hidrologia é o de que bacias florestadas produziam mais água do que bacias com outros tipos de cobertura vegetal, porém os autores apontam que o que realmente ocorre nesse caso é que bacias com maior fluxo vegetal produzem menos água, pois possuem fluxo mais estável e sustentável que em outros casos. Estudos defendem que em relação a outros tipos de utilização a formação florestal consome mais água e consequentemente reduz as vazões dos rios (HIBBERT, 1967; BOSCH e HEWLETT, 1982).

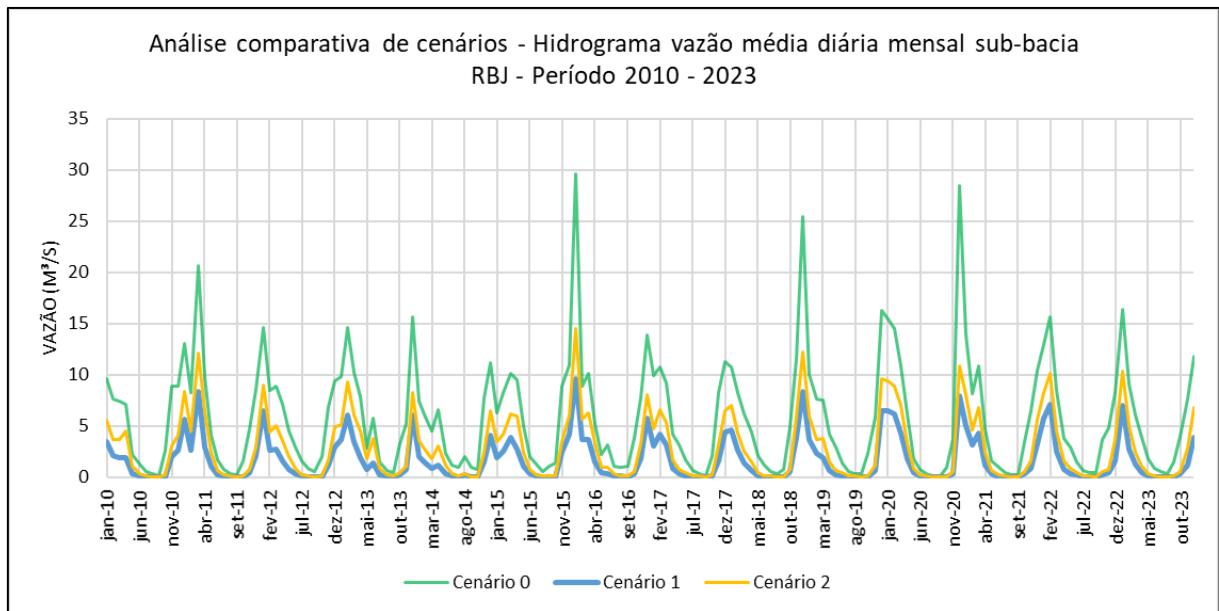
De acordo com Trimble et al. (1987), a redução das vazões observadas em bacias com formação florestal ocorre em função do aumento de perdas por evapotranspiração, sendo essa redução melhor observada em anos e períodos mais secos. Sendo assim, no trabalho desenvolvido por Balbinot et al. (2008), intitulado como “O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas”, demonstra por meio de uma revisão bibliográfica o que a simulação dessa pesquisa obteve como resultado do modelo, a substituição de vegetação por floresta nativa não aumenta a produção de água, porém o autor alerta ainda para o fato que cada situação tem suas particularidades que devem ser consideradas no momento de se executar quaisquer alterações no solo.

Vale ressaltar que os parâmetros calibrados para o Cenário Atual podem não ser totalmente adequados para a simulação de uma alteração do uso do solo. Embora esse tipo de cenário seja amplamente proposto por diversos autores, a alteração do uso do solo sem a devida mudança

dos parâmetros do modelo pode carecer de coeficientes mais adequados para representar novos usos do solo, ocasionando em vazões subestimadas ou superestimadas.

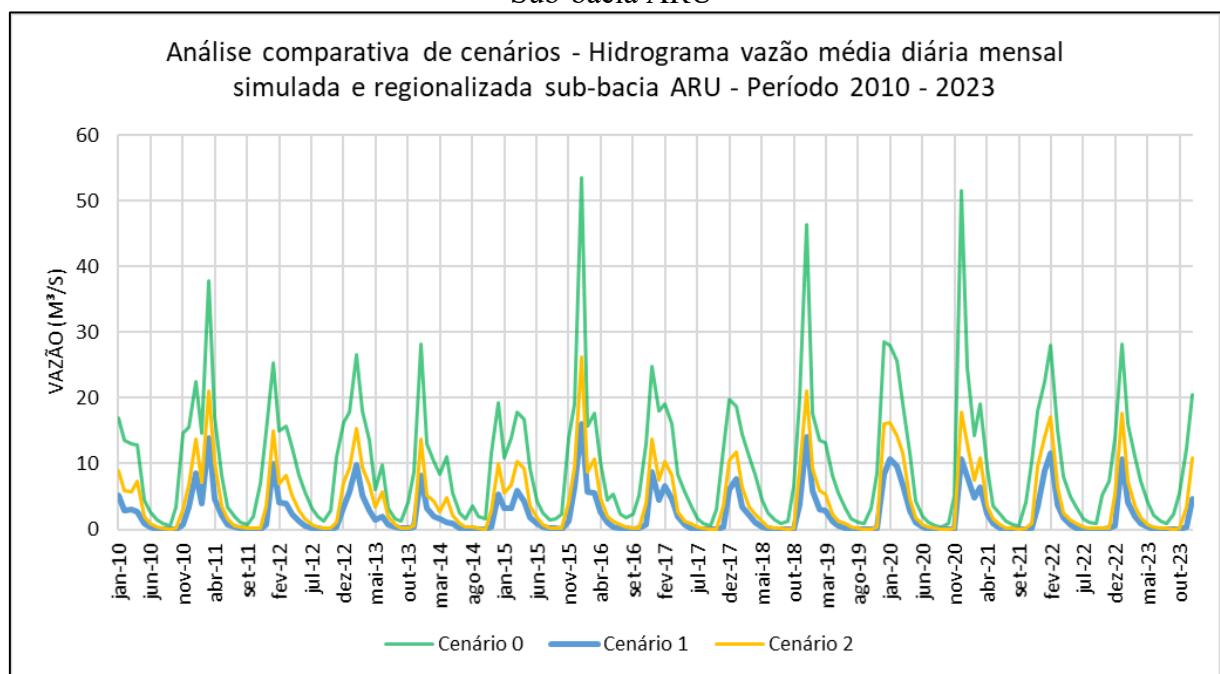
Tendo em vista as simulações realizadas para cada cenário, as Figuras 55 e 56 ilustram os hidrogramas obtidos em cada uma dessas simulações, demonstrando a comparação das vazões médias diárias mensais obtidas para cada sub-bacia.

Figura 55 – Análise comparativa dos Cenários – Hidrograma vazão média mensal – Sub-bacia RBJ



Fonte: Autora, (2025).

Figura 56 – Análise comparativa (Cenários e Outorgas) – Hidrograma vazão média mensal – Sub-bacia ARU



Fonte: Autora, (2025).

Ao correlacionar as vazões médias diárias nos hidrogramas, verifica-se que durante os períodos secos do ano, as vazões médias em todos os cenários simulados para as duas sub-bacias ficam comprometidas. Embora os hidrogramas não representem exaustivamente as condições reais da bacia, eles fornecem uma base consistente para análises de disponibilidade hídrica e gestão dos recursos.

4.8.5 Cálculo do Índice de Demanda Hídrica Superficial (IDHS)

O Índice de Demanda Hídrica Superficial (IDHS) consiste em uma metodologia desenvolvida por CGZAP (2023), com o objetivo de avaliar a oferta e demanda de água superficial de uma sub-bacia. A análise considera a relação entre a demanda hídrica total a montante do trecho, incluindo as outorgas de usos insignificantes concedidos ou autorizados pelo Igam e vazão de referência $Q_{7,10}$ do trecho.

Os valores encontrados para o IDHS são interpretados da seguinte maneira (CGZAP, 2023):

- Índice de nível 1 (baixo): demanda menor que 30% da $Q_{7,10}$;
- Índice de nível 2 (moderado/alto): demanda acima ou igual a 30 e inferior a 50% da $Q_{7,10}$;

- Índice de nível 3 (alto/crítico): demanda acima ou igual a 50% e inferior a 100% da $Q_{7,10}$;
- Índice de nível 4 (crítico): demanda acima ou igual a 100% da $Q_{7,10}$.

Com o objetivo de avaliar a segurança hídrica das sub-bacias esse índice foi calculado com base nos valores de vazões obtidos nas simulações. Para a sub-bacia RBJ, a vazão $Q_{7,10}$ simulada foi de $1,24 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto para a sub-bacia ARU o valor obtido da $Q_{7,10}$ foi de $2,22 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ao comparar esses resultados com os valores disponibilizados pela plataforma IDE-Sisema, a simulação demonstrou resultados de vazões inferiores às estimativas oficiais. Segundo os dados da IDE-Sisema, a Q_{90} e da $Q_{7,10}$ correspondem $2,81 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,55 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, para o exutório a montante da captação no Ribeirão Bom Jardim e $4,92 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,77 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, para o exutório do Alto Rio Uberabinha a montante da captação.

Utilizando os valores da $Q_{7,10}$ obtidos nas simulações, foram calculados os valores do IDHS resultando em 2,56 para o exutório a montante da captação no Ribeirão Bom Jardim e 2,00 para o exutório do Alto Rio Uberabinha a montante da captação. Esses resultados indicam que a região da sub-bacia RBJ apresenta condição crítica de disponibilidade hídrica (nível 4), enquanto a sub-bacia ARU encontra-se em nível alto/crítico (nível 3), segundo a classificação adotada.

A partir de todas as análises feitas nessa etapa, ainda que existam limitações relacionadas a aplicação do modelo SWAT, esse se confirma como uma ferramenta robusta para avaliação hidrológica, auxiliando nos estudos relacionados ao planejamento estratégico e no uso sustentável dos recursos hídricos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo demonstra como a modelagem hidrológica semidistribuída utilizando o SWAT+ pode ser bem sucedida para estudos de disponibilidade hídrica em regiões brasileiras, nesse estudo enfatizando principalmente o bioma do cerrado. A elaboração de um banco de dados bem estruturado e embasado nos parâmetros físicos e climáticos das sub-bacias se demonstrou como uma etapa de grande relevância para o sucesso da simulação.

Fica evidente que durante a elaboração do banco de dados dos parâmetros físicos e climáticos, algumas limitações foram sendo encontradas, uma delas foi a necessidade de inserção no banco de dados do software de todos os parâmetros relacionados aos solos existentes nas áreas de estudo, visto que dentro no programa não estão contidos os dados de solos brasileiros, sendo esse tema, inclusive, objeto de estudo de algumas pesquisas no país. Neste trabalho, foram utilizados parâmetros obtidos por autores brasileiros.

Além disso, a existência de somente duas estações de monitoramento ativas próximo às áreas de estudo (uma estação fluviométrica e uma estação climática) corroboraram para que os dados inseridos no modelo fossem limitados em relação à quantidade de informações disponíveis e também ao período monitorado, visto que somente a partir de 2007 os dados climáticos começaram a ser inseridos de forma sistemática. Nesse contexto, a necessidade de realização de uma regionalização de bacia foi essencial para que as simulações pudessem ser conduzidas para a sub-bacia RBJ.

Após a primeira etapa de execução, os resultados obtidos na simulação para vazões, sem a calibração, apresentaram linhas de tendência que acompanharam os movimentos dos dados observados na estação fluviométrica. Entretanto, verificou-se superestimativas das vazões máximas e subestimativas das vazões mínimas, demonstrando a importância da calibração para a aplicação do modelo. Ainda assim, houve coerência na tendência dos valores obtidos o que demonstrou a potencialidade do software para representar o regime hidrológico dessas sub-bacias.

Na etapa de calibração e validação do SWAT+ utilizou-se o software Toolbox, desenvolvido para essa finalidade, permitindo que fosse realizado a análise de sensibilidade dos parâmetros de forma individual e global, determinando os parâmetros que mais influenciavam no modelo e a determinação dos coeficientes adequados para a calibração. Durante a análise de sensibilidade, a partir de trabalhos de outros autores que indicavam os parâmetros mais sensíveis, diversas variáveis foram testadas, tendo-se obtido os parâmetros ALPHA, CN2, ESCO, SOL_AWC, REVAP_CO, SLOPE, SOL_K, SURLAG, CANMX, SOL_BD como os parâmetros mais sensíveis para esse modelo.

Após a calibração observou-se uma melhoria significativa nos gráficos diários, mensais e nos índices de qualidade da simulação (NSE, PBIAS e R²) para o período calibrado, seis anos. Os valores dos parâmetros ajustados foram comparados com aqueles reportados em outras bibliografias com simulações em bacias brasileiras, nessa análise verificou-se que os resultados obtidos estavam compatíveis com os valores encontrados por outros autores, demonstrando a validade da calibração.

Em seguida foi realizado a validação do modelo para um período de oito anos posterior ao período calibrado. A aplicação dos parâmetros ajustados nessa etapa demonstrou o bom desempenho da simulação, com índices de qualidade satisfatórios para PBIAS e R². O índice NSE obteve um resultado não satisfatório, entretanto alguns estudos indicam que em determinadas condições, como em bacias com alta variabilidade ou sujeita a eventos extremos, esse índice pode apresentar limitações na avaliação do desempenho. Sendo assim, apesar do NSE não atingir um valor satisfatório, os demais índices de qualidade e também a coerência dos parâmetros calibrados reforçam a confiabilidade do modelo para a área de estudo.

Para avaliação da disponibilidade hídrica em cada uma das sub-bacias utilizou-se a vazão Q90, obtida por meio das curvas de permanência. Essas curvas são uma ferramenta estatística amplamente utilizada para esse fim, permitindo a demonstração da magnitude e a frequência das vazões ao longo de uma série temporal. Os valores encontrados para a sub-bacia RBJ e ARU, respectivamente, foram 2,27 m³/s e 3,94 m³/s.

As vazões de disponibilidade hídrica encontradas foram utilizadas como Cenário 0 para servir de comparação com os resultados obtidos dos outros cenários simulados. Realizou-se a

simulação de dois cenários para cada sub-bacia nessa pesquisa. O Cenário 1 consistiu em um cenário de crise hídrica, em que foram simuladas as alterações no ciclo hidrológico das bacias ao se diminuir 20% das precipitações nas bacias ao longo de um período de 17 anos. Esse cenário demonstrou uma redução da vazão escoada em 53,30% na sub-bacia RBJ e 72,59% na sub-bacia ARU.

Para o Cenário 2 propôs-se a ampliação de área em formação florestal nas sub-bacias para valores por volta de 70% em cobertura florestal. Nesse cenário também se observou uma redução das vazões escoadas, demonstrando que a alteração do uso do solo aumenta os valores de infiltração e de escoamento de base e em consequência gera uma diminuição dos valores de escoamento superficial. As reduções observadas para esse cenário foram em 39,65% na sub-bacia RBJ e 54,82% na sub-bacia ARU.

É evidente que os cenários não devem ser vistos como previsões, mas sim como uma ferramenta que permite analisar e estudar as mudanças no comportamento hidrológico a partir de alterações climáticas e físicas na bacia. Com todos os parâmetros calibrados, diversos cenários podem ser testados e avaliados como forma de se estudar o planejamento estratégico dessas sub-bacias.

No que se refere à demanda hídrica das sub-bacias, ao se verificar as vazões médias diárias encontradas nos hidrogramas é possível observar valores bem reduzidos durante os períodos de estiagem, em todos os cenários simulados, para as duas sub-bacias. Esse comportamento observado ao longo dos anos revela uma importante questão de gestão de recursos hídricos, em períodos de escassez a demanda hídrica pode superar a disponibilidade de água nessas sub-bacias, colocando pressão sobre o sistema de abastecimento público. O desequilíbrio observado pode revelar a vulnerabilidade em atender às necessidades da população durante o período de seca, exigindo inclusive soluções complementares para garantir o fornecimento contínuo.

Os resultados obtidos demonstram ainda, que a dependência dessas duas sub-bacias para o abastecimento de água público para a cidade poderia ser arriscada, especialmente em anos com precipitações reduzidas e longos períodos de estiagem. Nesse contexto, a relevância da Estação de Tratamento de Água (ETA) Capim Branco se torna evidente. A ETA Capim Branco desempenha um papel fundamental no atendimento às necessidades de água da cidade, visto

que além de complementar a oferta de água durante os períodos de escassez hídrica, ela amplia a capacidade de fornecimento, garantindo maior segurança hídrica à população.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos da pesquisa foram alcançados, fornecendo uma série de informações sobre as sub-bacias RBJ e ARU e permitindo discussões relevantes a respeito da modelagem hidrológica e a influência de alteração de cenários na avaliação do ciclo hidrológico. A ferramenta SWAT+ demonstrou sua viabilidade e eficiência como suporte ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos, destacando-se como instrumento de planos de manejo e gestão integrada de bacias hidrográficas.

Estudos futuros em outras bacias na região, bem como em bacias localizadas em diferentes áreas são recomendadas para validar a aplicabilidade do método em locais distintos. Além disso, pesquisas relacionadas à calibração dos parâmetros do modelo voltados para o desenvolvimento de cenários, com alteração dos índices calibrados no cenário original para aproximar os das condições simuladas para o cenário, podem contribuir significativamente na melhor performance dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017: relatório pleno.** Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/74286. Acesso em: 11 abr. 2024.

ANA – Agência Nacional das Águas. 2019. **Plano Nacional de Segurança Hídrica.** Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 12 de maio de 2024.

ANA - Agência Nacional das Águas. 2021. **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/cnrh/cnrh/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos_2021. Acesso em: 08 de maio de 2024.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2021. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório pleno. Brasília.** Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 25 de abril de 2024.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2023. **ANA e IBGE lançam inéditas bases de dados hidrográficos do Brasil.** Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-e-ibge-lancam-ineditas-bases-de-dados-hidrograficos-do-brasil>. Acesso em: 17 de maio de 2024.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2023. **Divisão Hidrográfica segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos.** Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/623673f5-4594-4f0f-96a1-78558083e8d9>. Acesso em: 12 de abril de 2024.

ANTUNES, Sofia Santini Henrique *et al.* **A importância da Área de Relevante Interesse Ecológico Capetinga Taquara – DF: simulação hidrológica utilizando o modelo SWAT.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2023. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2023.

ARAGÃO, R. et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, p. 1091-1102, 2013. Acesso em: 31 de março de 2025. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400026>.

ARANTES, Eudes José. **Capítulo 8 – Escoamento Superficial.** Apostila da disciplina de **Hidrologia.** UTFPR, [s.d.]. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/eudesarantes/disciplinas/hidrologia/Cap_8_Eescoamento_Superficial.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 55, n. 4. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: **Model development.** **Water Resources Association American.** Middleburg, v. 34, n. 1. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.

ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation: Version 2012.** College Station, Texas Water Resources Institute, 2012b.

BACK, A; ZAMBRANO, G. J. D.; CORSEUIL, C. 2019. **Streamflow permanence curve of the river Timbó.** Santa Catarina, Brazil. *Acta Brasiliensis*, v. 3, n. 2. <https://doi.org/10.22571/2526-4338182>.

BAKKER, K. **Water security: research challenges and opportunities.** Science, v. 337, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1126/science.1226337>.

BALBINOTI, Rafael et al. **O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas.** Ambiência, Guarapuava, PR, v. 4, n. 1, p. 131-150, jan./abr. 2008. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiente/article/download/294/1892>. Acesso em: 17 abr. 2025.

BARTH, F.T.; POMPEU, C.T. Fundamentos para a gestão de recursos hídricos. In: BARTH F.T. *et al. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos.* São Paulo: Nobel: ABRH, 1987. cap. 1, p.1-91.

BASE AEROFOTO. **O que é Sistema de informação geográfica.** Disponível em: <https://www.baseaerofoto.com.br/?s=sig>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

BENNETT, N.D., CROKE, B.F.W., GUARISO, G., GUILLAUME, J.H.A., HAMILTON, S.H., JAKEMAN, A.J., MARSILLI-LIBELLI, S., NEWHAM, L.T.H., NORTON, J.P., PERRIN, C., PIERCE, S.A., ROBSON, B., SEPPELT, R., VOINOV, A.A., FATH, B.D. AND ANDREASSIAN, V. **Characterising performance of environmental models.** 2023. **Environmental Modelling and Software.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285693132>. Acesso em: 10 de abril de 2024.

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil.** 136 f. 2011. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

BONUMÁ, N.B. et al. **Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, nov. 2013.

BORGES, F. A. 2012. **Caracterização temporal das áreas úmidas e de preservação permanente da porção de alto e médio curso da bacia hidrográfica do Rio Uberabinha – MG com a aplicação de técnicas de geoprocessamento.** Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16130>. Acesso em: 05 de abril de 2024.

BORGES, L. F. A.; et al. 2023. **IPSAL: Implementação do módulo para geração da sequência e índices de Sobol.** *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 33, n. 2, p. 60-69, dez. 2023. <https://doi.org/10.14295/vetor.v33i2.16439>.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.** *Journal Hydrology.*, Amsterdam,v.55, p.3-23, 1982. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2).

BRANDÃO, L. O. A. Utilização do Modelo SWAT para Análise de Respostas Hidrológicas em Diferentes Cenários na Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu – Bahia. 2024. 152 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2024.

BRASIL. [Constituição (1988)]. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf. Acesso em: 15 março de 2024.

BRASIL. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm>. Acesso em: 10 de abril de 2024.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 05 de junho de 2024.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. Brasília, DF: Senado Federal. Disponível em: <https://abrir.link/xsyGF>. Acesso em: 22 de março de 2024.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 jul. 2000.

BRASIL. Mapbiomas. Downloads. 20240. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>. Acesso em: 14 de julho de 2024.

BRESSIANI, D.A., GASSMAN, P.W., FERNANDES, J.G., GARBOSSA, L.H.P., SRINIVASAN, R., BONUMÁ, N.B., MENDIONDO, E.M. 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. International

Journal of Agricultural and Biological Engineering. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.1765>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

BRIGHENTI, Tássia Mattos; BONUMÁ, Nádia Bernardi; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. **Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/4hb9MGW9LGxnmxZHxLmbt5C/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 de dezembro de 2024.

BRITO, A. R. E MISSIO, F. 2019. **Regulação e hidropolítica na fronteira Brasil - Paraguai.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338559276>. Acesso em: 30 março de 2024. <https://doi.org/10.5380/dma.v52i0.65310>.

CASTRO, N. de C. 2022. **Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica.** Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/1/%C3%81gua_problemas_complexos.pdf. Acesso em: 03 de abril de 2024. <https://doi.org/10.38116/978-65-5635-031-8>.

CECCONELLO, Samanta Tolentino *et al.* **Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT+) em bacia hidrográfica rural, no sul do Rio Grande do Sul.** In: SEMANA INTEGRADA DA UFPEL, 9., 2023, Pelotas. Anais [...]. Pelotas: UFPel, 2023.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas: papel da ciência, tecnologia e inovação na adaptação a mudanças climáticas em recursos hídricos.** Brasília, DF: CGEE, 2014.

COMITÊ GESTOR DO ZONEAMENTO AMBIENTAL E PRODUTIVO - CGZAP (Minas Gerais). **Metodologia do Zoneamento Ambiental e Produtivo de sub-bacias hidrográficas.** 4ª Edição, 2023.

CID. D. A. C. 2023. **Modelagem colaborativa e jogo sério para a tomada de decisão de alocação de águas em reservatórios durante secas (tese).** Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/74121>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

COOK, C.; BAKKER, K. 2012. **Water security: debating an emerging paradigm.** Global Environmental Change, v. 22, n. 1. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>.

DI SILVA, F. D. M. *Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados.* 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Brasília, 2016.

DMAE. **Capim Branco.** Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/orgaos-municipais/dmae/tratamento-de-agua/capim-branco-2/>. Acesso em: 15 de abril de 2024.

DMAE. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Comitê Técnico de Regulação dos Municipais Serviços de Saneamento Básico – CRESAN, Rev. Set/2019. Disponível em: https://docs.uberlandia.mg.gov.br/wp-content/uploads/2019/09/PMSB-Revisao-Consolidada_RecomMP_11-09-19.pdf. Acesso em: 01 de junho de 2024.

DORCA, Cristiano C.; LUVIZOTTO JR., Edevar; ANDARADE, José Geraldo P. **Aspectos da implantação de um SIG em pequenos e médios abastecimentos de água. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica e Saneamento da UFPB.** Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/trabalhos/A06_19.pdf>. Acesso em: 30 de abril de 2024.

EMBRAPA. 2024. **Manejo de Recursos Hídricos.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-manejo-de-recursos-hidricos/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 03 de maio de 2024.

EMPRAPA. **Classificação dos solos.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelhos>. Acesso em: 15 maio de 2024.

FAYAL, M. A. de A. 2008. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada (dissertação).** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 158p. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12169/12169_1.PDF. Acesso em: 29 de abril de 2024.

FRANCO, A. C. L. **Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa

Catarina, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/176915>. Acesso em: 31 de março de 2025.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo.** 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

GEOAPLICADA. 2022. **Fundamento de Cartografia Aplicada.** Disponível em: <https://www.geoaplicada.com/cartografia-para-sig/>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

GWP. 2000. **Towards water security: a framework for action.** Global Water Partnership Estocolmo.

HIBBERT, A.R. **Forest treatment effects on water yield.** In: SOPPER, W.E.; LULL,H.W.(eds.) *Forest Hydrology*, New York: Pergamon, 1967. p.527-543.

IBGE. 2007. **Manual técnico de pedologia.** Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

IBGE. 2023. **Panorama Uberlândia - MG.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>. Acesso em: 23 de abril de 2024.

IBGE. **Cobertura e Uso da Terra do Brasil.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15833-uso-da-terra.html?=&t=downloads>. Acesso em: 25 de abril de 2024.

IBGE. **Introdução ao ambiente SIG QGIS.** 2018. 144p. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outras_documentos_tecnicos/introducao_sig_qgis/Introducao_ao_ambiente_SIG_QGIS_2edicao.pdf. Acesso em: 18 de abril de 2024.

IBRAHIN, F. I. D. 2014. **Introdução ao geoprocessamento ambiental.** Saraiva Educação SA.

IGAM. **Organograma.** Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/organograma>. Acesso em: 14 de maio de 2024.

IGAM. Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SEGRH. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/sistema-de-gerenciamento>. Acesso em: 10 de abril de 2024.

INPE. 2024. **Introdução ao geoprocessamento.** Disponível em: [https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20geoprocessamento%3F,de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20Geogr%C3%A1fica%20\(SIG\)](https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20geoprocessamento%3F,de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20Geogr%C3%A1fica%20(SIG)). Acesso em: 25 de março de 2024.

JUNIOR, J. L. B. Análise da disponibilidade Hídrica da Bacia do Rio Jundiaí por meio de simulações Hidrológicas de Cenários Prováveis. 2014. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. 2014. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=465805>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2024.

KUNTSCHIK, G. (2020). *Geoprocessamento com Software Livre*. São Paulo: Oficina de Textos.

LEAL, A.C. 2000. **Gestão das águas no Pontal do Paranapanema.** 2000. Tese. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/190520>. Acesso em: 05 de abril de 2024.

LIMA, W. P. 2008. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.** 2 ed. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba, SP. 253 p.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. 2006. **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento.** Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001519345>. Acesso em: 15 de abril de 2024.

LIMA, J. E. F. W. et al. 2013. **Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado.** Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP013442.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2024.

LOU, R. F. 2010. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ (dissertação).** UFRJ. 174p. Disponível em:

http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=182438. Acesso em: 02 de maio de 2024.

MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; NORTON, L.D.; SILVA, A.M.; ACERBI JÚNIOR, F.W. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian head water basin. **Catena**, v. 75, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.002>.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. 2001. **Geoprocessamento em recursos hídricos–princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre, RS: ABRH, 534p.

MIGUEL, B. H. 2016. **Análises de incertezas e de sensibilidade aplicadas ao Modelo Hidrológico chuva vazão SCS – atributo Curve Number**. Disponível em: http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=ser301-2016:trabalho_final_analise_espacial_barbara.pdf. Acesso em: 15 de abril de 2024.

MINAS GERAIS. **Lei nº 11.509, de 20 de junho de 1994**. Dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos e dá outras providências. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa, 1994. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/11504/1994/>. Acesso em: 20 de março de 2024.

MINAS GERAIS. **Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999**. Dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos e dá outras providências. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa, 1999. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/13199/1999/>. Acesso em: 20 de março de 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003**. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2032.pdf>. Acesso em: 28 de março de 2024.

MORAES, J. M. 2003. **Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 8(1):61-70. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p61-70>.

MORIASI, D. N. *et al.* **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** *Transactions of the ASABE*, v. 50, p. 885–900, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.

MORIASI, D.N.; GITAU, M.W.; PAI, N.; Daggupati, N., (2015). **Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria.** Am. Soc. Agric. Biol. Eng., 58(6): 1763-1785 (23 pages).

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles.** *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, abr. 1970. Acesso em: 15 de Janeiro de 2025. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. 2009. Soil and Water Assessment Tool - **Theoretical Documentation**. College Station, Blackland Research Center, Texas A&M University. 647 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY J.R.; WILLIAMS, J.R. 2005. **Soil and water assessment tool:** Theoretical documentation, version 2005. Agricultural Research Service and Texas AgriLife Research. Texas, 2005.

NOGUEIRA, Moira Paranaguá. **Aplicação do modelo SWAT+ na análise da integridade da zona ripária na bacia hidrográfica do córrego Capão Comprido (DF).** 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2023.

NUNES, F. M. S. **Avaliação hidrossedimentológica de uma bacia sem dados de vazão utilizando o modelo SWAT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2018.

OLIVEIRA, L. T. 2014. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES.** Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/5030>. Acesso em: 25 de maio de 2024.

PINTO, N.L.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A. **Hidrologia de superfície.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 179 p.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Tratamento de água.** Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/orgaos-municipais/dmae/tratamento-de-agua/>. Acesso em: 04 de abril de 2024.

QGIS. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2024.

RIBEIRO, Celso Bandeira de Melo *et al.* **Modelagem hidrológica de vazões na Bacia Amazônica utilizando o modelo SWAT.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. Anais [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2015.

SAITO, C. H. 2018. **Gestão Integrada de Recursos Hídricos: Desenvolvendo Capacidades para a Construção de Visão Sistêmica sobre Gestão das Águas.** Disponível em: <http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/34866>. Acesso em: 30 de maio de 2024.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau.** 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

SARMENTO, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas.** 2010. 241 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

SELL, Bruna Moreira *et al.* **Desempenho estatístico do SWAT+ na modelagem hidrológica de uma grande bacia do Pampa Brasileiro.** In: SEMANA INTEGRADA DA UFPEL, 8., 2022, Pelotas. Anais [...]. Pelotas: UFPel, 2022.

SILVA et. al. **Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff–erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil.** Environmental Monitoring and Assessment. vol 185, n.11, p. 897-899, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3228-x>.

SILVA, L.; COTA, S. D. S. **Derivação de parâmetros para o uso do modelo SWAT na estimativa de recarga subterrânea em um aquífero cárstico-fissural do semiárido brasileiro.** Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 22–33, 2019. Acesso em: 31 de março de 2025. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29160>.

SWAT+ TOOLBOX. Versão 3.0.4. Disponível em:
<https://celray.github.io/SWATPlusToolbox/3.0.4/>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2025.

TOLSON, B. A.; SHOCMAKCR, C. A. *Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration*. *Water Resources Research*, v. 43, W01413, 2007. Acesso em: 15 de fevereiro de 2025. <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>.

TRIMBLE, S.W.; WEIRICH, F.H.; HOAG, B.L. **Reforestation and the reduction of water yield on the southern Piedmont since circa. 1940**. *Water Resources Researche*, Washington, v.23, p.425-437, 1987. <https://doi.org/10.1029/WR023i003p00425>.

TUCCI, C. E. M. 1998. **Modelos hidrológicos**. Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p.

TUCCI, C. E. M. 2005. **Modelos Hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS.

TUCCI, C. E. M. E CHAGAS, M. de. F. 2018. **Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais**. Disponível em:
<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=2&ID=198&SUMARIO=5322>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

VIANA, J. F. S. et al. **Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – PE utilizando o modelo SWAT**. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 3, n. 1, p. 155-172, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1709.155-172>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2025. <https://doi.org/10.24221/jeap.3.1.2018.1709.155-172>.

VIANA, Jussara Freire de Souza et al. **Calibrações parciais do modelo SWAT como suporte ao sistema de unidades de resposta hidrológica para Pernambuco (SUPer): bacia do rio Pajeú**. In: XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, [2020]. Anais... [S.l.]: ABRHidro.

ZAZONI, D.A. 2023. **Modelos hidrológicos para estimativa de vazões e impacto de mudanças na ocupação do solo sobre a disponibilidade hídrica (tese)**. 50p. UFMS. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/12471>. Acesso em: 20 de abril de 2024.