

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA CENTRO DE CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO**

**MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA  
DO ALTO DO PARAGUAÇU**

**Lany Cunha Mendes**

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA  
2024**

# MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO ALTO DO PARAGUAÇU-BA

**LANY CUNHA MENDES**

Engenheira Sanitarista e Ambiental  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2024

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Prof. Dr. Everton Luís Poelking

Coorientador: Prof. Dr. Thomas Gloaguen  
Vincent

CRUZ DAS ALMAS - BA  
2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

Am	<p>Mendes, Lany Cunha. Modelagem da Disponibilidade Hídrica na Bacia do Alto do Paraguaçu-BA / Lany Cunha Mendes. Cruz das Almas, BA, 2024. f. 50; il.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Mestrado em Engenharia Agrícola.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Everton Luis Poelking Coorientador: Prof. Dr. Thomas Gloaguen Vincent</p> <p>CDD:</p>
----	--

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB. Responsável pela Elaboração –Antonio Marcos Sarmiento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA CENTRO DE CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO**

**MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO ALTO DO  
PARAGUAÇU-BA**

Comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado de  
Lany Cunha Mendes

Aprovada em 29 de fevereiro de 2024

---

Prof. Dr. Everton Luís Poelking  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Orientador

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Roberta Alessandra Bruschi  
Gonçalves  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Examinador externo

---

Dr. Paulo Romero Guimarães Serrano de  
Andrade  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Examinador externo

## DEDICATÓRIA

A toda espiritualidade que sempre esteve comigo, a minha família, professores e amigos.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

Á Deus primordialmente pela dádiva da vida e pelas bênçãos a mim concedidas;

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em especial ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela formação acadêmica;

Aos meus pais, Anaildes Cunha Mendes e Edilton Aguiar Mendes, pela dádiva da vida, por todo incentivo, suporte emocional, e pela positividade.

Ao meu parceiro Erik Kulhavy por todo amor e dedicação comigo.

Ao meu professor e orientador Everton Luís Poelking, por me guiar com toda paciência, acreditar e colaborar significativamente para o sucesso deste trabalho;

Ao meu coorientador Dr. Thomas Gloaguen pelo apoio e direcionamentos;

Aos meus colegas que sempre se colocaram disponível para me auxiliar neste trabalho: Valdenice, Felipe, Daniel, Jorge e Geovana. Em especial Thaís, que participou diretamente.

Aos servidores da UFRB (Ícaro), e da recepção até a secretaria (Sueli);

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus avós Maria e Rosalino, as minhas tias Anete, Célia, Tatai, primas, tios, e madrinha Roberta, por todo amor e incentivo ao meu ingresso no ensino superior;

Ao meu irmão Alan, por ser um exemplo no ramo da Engenharia e minha sobrinha Anallu;

A minha avó materna Amélia (in memorium) que certamente está orgulhosa lá de cima, e meu avô Tobias (in memorium).

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação profissional e pessoal;

Meu muito obrigada!!

## MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO ALTO DO PARAGUAÇU

**RESUMO:** A bacia do alto do rio Paraguaçu, localizada na região da Chapada Diamantina, Bahia, vem sofrendo um intenso processo de alteração em sua paisagem motivado pela expansão das áreas agrícolas, sendo necessária a adoção de instrumentos para estudos que avaliem os impactos ambientais principalmente nos recursos hídricos superficiais. Visto isso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento hidrológico da bacia do alto do Paraguaçu utilizando o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), a fim de entender a dinâmica da água e uso da terra ao longo do tempo (1984 à 2021), com o intuito de avaliar a evolução do uso e ocupação da terra e o impacto na resposta hidrológica da bacia do Paraguaçu. A metodologia deste estudo é composta por 02 etapas: (I) Aquisição da Base de Dados :1) Variáveis físicas: Modelo Digital de Elevação, pedologia e uso e ocupação da terra. 2) Dados diários de precipitação, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura mínima e máxima, radiação solar dos anos de 1985 à 2021; e (II) Modelagem hidrológica com o SWAT manualmente em 03 períodos: de aquecimento (1984-1986), calibração (1987-2006), validação (2007-2021), respectivamente. Os resultados do comparativo entre vazão observada e simulada pelo SWAT no período de 1984 a 2021 mostraram resultados da análise de eficiência do modelo com um Coeficiente de eficiência O Coeficiente de Eficiência de NashSutcliffe de 0,68 e um Erro Médio = -0,16 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram relacionados às propriedades físicas do solo e ao manejo, como o número da curva, capacidade de água disponível e a condutividade hidráulica. Em 2021, os valores de vazão máxima e média caíram 45% e 26,79%, nessa ordem, e a mínima reduziu cerca de 12,75% em relação ao ano de 1985. Indicando uma redução nas médias das vazões mínimas nesta bacia. Houve inconsistências nos dados de vazão, que impossibilitou realizar previsões futuras, necessitando mais calibrações. A sugestão para os próximos trabalhos é que se realize uma regionalização de vazão, uma técnica usada para estimar dados fluviométricos em locais sem medições, aplicando informações de bacias hidrográficas similares.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica SWAT, Bacia hidrográfica, Recursos Hídricos.

## MODELING OF WATER AVAILABILITY IN THE ALTO DO PARAGUAÇU BASIN

**ABSTRACT:** The upper Paraguaçu river basin, located in the Chapada Diamantina region, Bahia, has been undergoing an intense process of change in its landscape caused by the expansion of agricultural areas, making it necessary to adopt instruments for studies that evaluate environmental impacts, mainly on resources. surface water. Given this, the present work aimed to evaluate the hydrological behavior of the upper Paraguaçu basin using the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool), in order to understand the dynamics of water and land use over time (1984 to 2021), with the aim of evaluating the evolution of land use and occupation and the impact on the hydrological response of the Paraguaçu basin. The methodology of this study consists of 02 stages: (I) Acquisition of the Database: 1) Physical variables: Digital Elevation Model, pedology and land use and occupation. 2) Daily data on precipitation, wind speed, relative humidity, minimum and maximum temperature, solar radiation from 1985 to 2021; and (II) Hydrological modeling with SWAT manually in 03 periods: warming (1984-1986), calibration (1987-2006), validation (2007-2021), respectively. The results of the comparison between flow observed and simulated by SWAT in the period from 1984 to 2021 showed results from the model efficiency analysis with an Efficiency Coefficient The NashSutcliffe Efficiency Coefficient of 0.68 and an Average Error =  $-0.16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . The most sensitive parameters of the model were related to the physical properties of the soil and management, such as the curve number, available water capacity and hydraulic conductivity. In 2021, the maximum and average flow values fell by 45% and 26.79%, in that order, and the minimum reduced by approximately 12.75% compared to 1985. Indicating a reduction in the average minimum flows in this basin. There were inconsistencies in the flow data, which made it impossible to make future predictions, requiring further calibrations. The suggestion for future work is to carry out flow regionalization, a technique used to estimate fluviometric data in places without measurements, applying information from similar river basins.

**Keywords:** SWAT hydrological modeling, River basin, Water availability.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. HIPÓTESES</b> .....	<b>17</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 Objetivo geral.....	17
3.2 Objetivos específicos .....	17
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
4.1 Bacia Hidrográfica e Ciclo Hidrológico .....	18
4.2 Modelagem Hidrológica: Tipos e classificação.....	21
4.3 Modelagem hidrológica com a ferramenta SWAT .....	26
4.4 Uso do SWAT para alterações do uso e cobertura do solo.....	28
4.5 Aplicação do SWAT no Brasil e Estado da Bahia .....	28
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>(I) Aquisição da Base de Dados</b> .....	<b>33</b>
5.1 Obtenção e preparação de dados de entrada.....	33
5.2 Caracterização Geográfica .....	39
A) Localização.....	39
B) Hidrografia.....	41
C) Geologia e solos.....	42
D) Clima.....	44
E) Vegetação.....	45
<b>(II) Modelagem hidrológica com o SWAT</b> .....	<b>47</b>
5.3 Delimitação das sub-bacias hidrográficas .....	47
5.4 Geração de Unidades de Respostas Hidrológicas .....	50
5.5 Dados climáticos.....	50
5.6 Calibração e Validação do Modelo SWAT .....	52
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>56</b>
6.1 Análise de vazão.....	63
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>67</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01.</b> Representação do ciclo hidrológico.....	18
<b>Figura 02.</b> Fluxograma do processo de modelagem usando o SWAT PLUS. ....	34
<b>Figura 03.</b> Evolução histórica do uso da terra na Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA.....	36
<b>Figura 04.</b> Bacia hidrográfica do Paraguaçu e Bacia hidrográfica do Alto do Paraguaçu, Bahia...	39
<b>Figura 05.</b> Localização da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA.....	40
<b>Figura 06.</b> Delimitação dos rios principais, secundários e terciários, e Barragem do Apertado da bacia do Rio Paraguaçu, BA.....	41
<b>Figura 07.</b> Mapa de classes de solos da bacia do alto Paraguaçu.....	43
<b>Figura 08.</b> Classificação climática da Bacia do Alto do Paraguaçu, BA.....	45
<b>Figura 09.</b> Delimitação da bacia do Alto do Paraguaçu, BA e Sub-bacias com rede de drenagem através do SWAT.....	48
<b>Figura 10.</b> Delimitação das Sub-Bacias hidrográficas do Alto Paraguaçu, BA.....	49
<b>Figura 11.</b> Resumo das estações climáticas selecionadas.....	51
<b>Figura 12.</b> Imagem com as proporções de sedimentos para esta bacia.....	58
<b>Figura 13.</b> Relatório sobre os sedimentos.....	58
<b>Figura 14.</b> Uso e distribuição da terra de acordo com o SWAT.....	59
<b>Figura 15.</b> Hidrologia média da bacia gerado pelo SWAT.....	60
<b>Figura 16.</b> Distribuição das nascentes e áreas de potencial alagamento da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA.....	62
<b>Figura 17.</b> Distribuição das nascentes e áreas de potencial alagamento da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA.....	63
<b>Figura 18.</b> Gráfico representativo de vazão na bacia de contribuição 51120000.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01.</b> Dados pedológicos usados no modelo SWAT.....	38
<b>Tabela 02.</b> Classificação climática Koppen atualizada por Alvares .....	44
<b>Tabela 03.</b> Razões de equilíbrio hídrico.....	31
<b>Tabela 04.</b> Dados gerados pela simulação no SWAT.....	60

## LISTA DE GRÁFICO

<b>Gráfico 01.</b> Hidrograma da vazão simulada versus vazão observada.....	65
<b>Gráfico 02.</b> Vazão simulada versus vazão observada.....	62

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 01.</b> Relação de tipos de modelos hidrológicos mais utilizados.....	22
<b>Quadro 02.</b> Classificação dos modelos hidrológicos.....	25
<b>Quadro 03.</b> Quantitativos e outras citações com exemplos qualitativos do SWAT.....	29
<b>Quadro 04.</b> Relação de outras aplicações do modelo SWAT no Brasil e área aplicada.....	31
<b>Quadro 05.</b> Informações resumidas dos dados de entrada usados no modelo SWAT.....	34
<b>Quadro 06.</b> Estações pluviométricas da ANA selecionadas para a obtenção de séries históricas da bacia hidrográfica do Alto do Paraguaçu.....	37
<b>Quadro 07.</b> Estações climáticas da NASA.....	37
<b>Quadro 08.</b> Informações geradas da bacia do Alto do Paraguaçu.....	50
<b>Quadro 09.</b> Informações da simulação no SWAT editor.....	51
<b>Quadro 10.</b> Métodos estatísticos para verificação dos resultados do modelo SWAT.....	53
<b>Quadro 11.</b> Resultados da calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos considerados.....	56
<b>Quadro 12.</b> Uso e cobertura da terra na bacia de contribuição Andaraí 1985 à 2021.....	61
<b>Quadro 13.</b> Posto fluviométrico utilizado para calibração e validação.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA\_BF – Constante de recessão do fluxo de base (dias)

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APP – Área de Preservação Permanente

ARS – Agricultural Research Service

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

BHRP – Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu

CERB – Companhia de Engenharia Ambiental da Bahia

CH\_N2 – Coeficiente de Manning do canal principal (s.m-1/3)

CN – Curva-número

CN2 – Curva número na condição II

COE – Coeficiente de Eficiência de NashSutcliffe

CREAMS – Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management

DEWPT – Temperatura média do ponto de orvalho no mês

EM – Erro médio

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPIC – Erosion-Productivity Impact Calculator

ESCO – Fator de compensação de evaporação do solo

FAO – Food and Agriculture Organization

GLEAMS – Groundwater Loading Effects on Agricultural Management

GW\_DELAY – Tempo de retardo da água subterrânea (dias)

GW\_REVAP – Coeficiente de água subterrânea

GWQMN – Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LAPIG – Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento

MDE – Modelo Digital de Elevação

MUSLE – Equação Universal de Perda de Solo Modificada

NRCS – Natural Resource Conservation Service

NS – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

PBIAS – Coeficiente Percent BIAS

PCPD – Número médio de precipitações no mês

PCPMM – Precipitação média mensal

PCPSKW – Coeficiente de assimetria para a precipitação diária a cada mês

PCPSTD – Desvio padrão da precipitação  
PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos  
PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos  
PW\_W1 – Probabilidade de dia úmido após dia seco  
PR\_W2 – Probabilidade de dia úmido seguido de dia úmido  
R<sup>2</sup> – Coeficiente de Determinação  
RCHRG\_DP – Fração de água percolada para o aquífero profundo  
SNGRH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos  
SOL\_AWC – Capacidade de água disponível no solo (mm H<sub>2</sub>O/mm solo)  
SOL\_K – Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)  
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission  
SUFI-2 – Sequential Uncertainty Fitting  
SURLAG – Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)  
SWRRB – Simulator for Water Resources in Rural Basins  
SWAT – Soil and Water Assessment Tool  
SWAT-CUP SWAT – Calibration and Uncertainty Procedures  
TOPMODEL – Topography based hydrological Model  
TMPMN – Precipitação média mínima mensal  
TMPSTDMN – Desvio padrão da temperatura mínima  
TMPMX – Precipitação média máxima mensal  
TMPSTDMX – Desvio padrão da temperatura máxima  
USGS – Earth Explorer da United States Geological Survey

## 1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu (BHRP) atualmente sofre com a expansão da agricultura irrigada, constante supressão de vegetação nativa, assoreamento, lançamento de esgoto sem tratamento e contaminação das águas pelo uso inadequado de defensivos agrícolas, crescimento urbano desordenado, entre outros problemas ambientais. Ela está localizada na região centro-leste do Estado da Bahia, compondo a Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA) de número 10 (INEMA, 2013) englobando 86 municípios, com área total de aproximadamente 54.578 km<sup>2</sup>, o equivalente a quase 10% do território baiano.

Na parte baixa da BHRP, localiza-se o Reservatório de Pedra do Cavalo, responsável pelo suprimento de água para o abastecimento de 60% da Região Metropolitana de Salvador, de acordo com os últimos levantamentos populacionais do IBGE de 2023, corresponde a, no mínimo, 2,4 milhões de pessoas. Além da geração de energia hidrelétrica por meio desta barragem, há um grande apelo turístico na região da Chapada Diamantina, com diversas nascentes e afluentes neste Parque Nacional. Devido à sua importância, tem sido também objeto de diversas pesquisas acadêmicas (SILVA et al, 2017; VALÉRIO & JÚNIOR, 2015; SILVA, 2012; SILVA, 2014; FONTES et al, 2010; GENZ, 2006). Segundo Souza (2017), a bacia do Paraguaçu, por possuir diversas outras barragens ao longo do curso principal do rio e em alguns afluentes como o rio Jacuípe que atendem a inúmeras demandas dos usos múltiplos, é apontada como a mais importante do Estado da Bahia.

A agricultura irrigada no alto da BHRP, vêm crescendo bastante nas últimas décadas. Usualmente esses sistemas utilizam a tecnologia de dispersão de água por pivôs centrais, onde há enormes perdas por causa da evaporação, demandando quantidades cada vez maiores de água bombeada do rio Paraguaçu ou de poços subterrâneos, diminuindo a recarga dos aquíferos e os fluxos naturais de recarga do rio. A irrigação é uma técnica de produção agrícola que por utilizar demasiado volume de água, tem sido vista como vilã no processo de uso compartilhado do recurso hídrico, pois concorre diretamente, em algumas regiões, com o setor da indústria e o abastecimento urbano (QUEIROZ et al., 2008). Esse método é baseado em um sistema de movimentação circular, constituído em geral de uma tubulação para condução de água sob pressão com vários aspersores de comprimento variável (BERNARDO et al., 2006).

O clima semiárido do Nordeste Brasileiro apresenta precipitações totais anuais baixas, com rios intermitentes (que ocorrem apenas em um período do ano, ou secam nas épocas de estiagem), além das altas taxas de evapotranspiração devido a altas temperaturas. Os solos rasos e a litologia de natureza predominantemente metamórfica também não são propícios para a retenção das águas superficiais e manutenção dos fluxos de água.

As bacias hidrográficas, deste modo, são consideradas excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais, pois as mudanças provocadas pelo homem e as correspondentes respostas da natureza podem ser monitoradas dentro de um espaço confinado pelos divisores de água, o que facilita o controle dos fenômenos e possível modelagem de situações e cenários. De acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº9.433 de 1997, a bacia hidrográfica deve ser a unidade territorial para implementar as políticas ambientais e onde deve atuar o gerenciamento dos recursos hídricos.

O conhecimento da disponibilidade dos recursos hídricos, portanto, é importante para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos pois ela é representada pelas vazões médias e mínimas, sendo seu conhecimento imprescindível (Novaes et al., 2009). A vazão média permite caracterizar a disponibilidade hídrica potencial de uma bacia (Pruski & Pruski, 2011) e as vazões mínimas caracterizam a disponibilidade hídrica natural ao longo da hidrografia (Smakhtin, 2001, apud Pruski, 2012).

A disponibilidade hídrica também é influenciada por uma série de fatores que devem ser considerados como o clima, a geologia, a topografia, a vegetação e as atividades humanas. O clima, por exemplo, determina a quantidade de chuvas em uma região, a geologia e a topografia afetam a capacidade de armazenamento de água e a recarga dos aquíferos, enquanto a vegetação desempenha um papel importante na regulação do ciclo hidrológico.

A modelagem hidrológica vem desta maneira, como uma ferramenta da hidrologia aplicada que através de uma representação matemática do fluxo de água serve para estabelecer as relações que determinam as variabilidades espacial, temporal e geográfica dos recursos hídricos. Especificamente o SWAT que se trata de uma ferramenta de avaliação de água e solo. Amplamente utilizado para simulações de erosão do solo, escoamento superficial e perda de nutrientes (Easton et al., 2010; Himanshu et al., 2019; Li et al., 2021; Singh & Saravanan, 2020b; Tan et al., 2021).

## **2. HIPÓTESES**

O desenvolvimento das áreas de irrigação na bacia do alto do Paraguaçu, BA de 1985 a 2021 (período de 36 anos) alterou a disponibilidade hídrica.

A ferramenta SWAT tem potencial em gerar base de informações para conceber um modelo da disponibilidade hídrica, dos fluxos de água, com possível quantificação dos impactos antrópicos, na escala da bacia.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar os impactos das alterações da cobertura vegetal e uso da terra na disponibilidade hídrica da Bacia do Alto do Paraguaçu, Bahia, com auxílio da modelagem hidrológica SWAT.

### **3.2 Objetivos específicos**

- (i) Calibrar e validar o modelo SWAT para modelar a disponibilidade hídrica na Bacia do Alto do Paraguaçu.
- (ii) Avaliar a evolução do uso e ocupação da terra e o impacto na resposta hidrológica da Bacia do Paraguaçu no período de 1985 à 2021.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

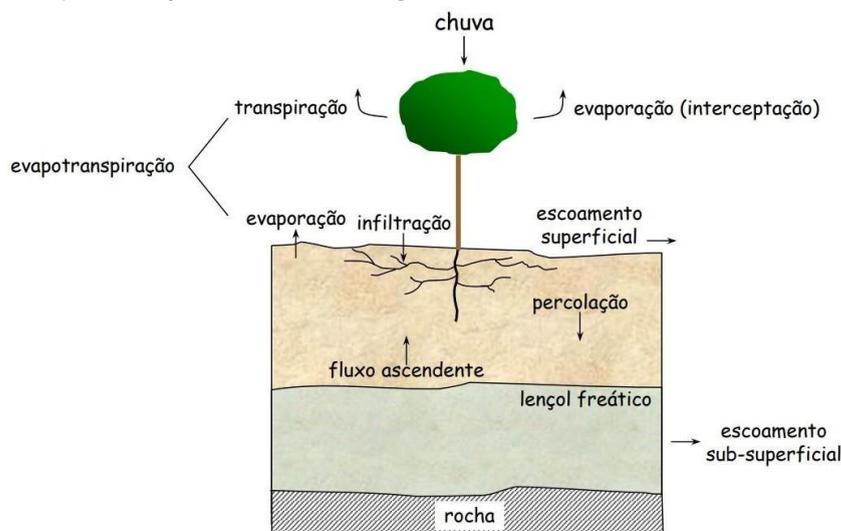
### 4.1 Bacia Hidrográfica e Ciclo Hidrológico

A Bacia Hidrográfica pode ser definida como uma área delimitada topograficamente onde toda água captada é drenada para um único ponto denominado exutório. Sua aplicação como unidade de estudo propicia levantamento regional mais completo, pois ela fornece informações físicas, biológicas e socioeconômicas da área (GUERRA et al., 2005). Através da delimitação da bacia hidrográfica é possível realizar estudos envolvendo uso e ocupação do solo e impactos decorrentes das atividades antrópicas dentro do limite territorial definido.

As transformações do uso da terra são ações que podem desencadear profundas modificações na dinâmica da água em uma bacia hidrográfica. O balanço hídrico é responsável pelo registro da dinâmica da quantidade de água em um determinado espaço físico, considerando uma unidade de tempo (TRENTIN et al., 2023).

O ciclo hidrológico pode ser estudado na bacia hidrográfica garantindo conclusões confiáveis sobre o impacto do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos (TEODORO et al., 2007). Este ciclo representado na Figura 01 demonstra o movimento contínuo e fechado da água que ocorre entre a superfície do planeta e a atmosfera, sendo primordialmente movido pela energia do sol, em conjunto com a força da gravidade e o movimento de rotação da Terra. O ciclo hidrológico pode ser definido como “as relações entre as várias formas do comportamento das águas em um ciclo fechado” (BIGARELLA & SUGUIO, 1990).

**Figura 01-** Representação do ciclo hidrológico



Fonte: INPE, 2008.

Uma das maneiras de analisar os impactos nos recursos hídricos é estudando o ciclo hidrológico. Isso é possível devido a sensibilidade que as fases deste ciclo apresentam em relação às alterações no uso e ocupação do solo. Melo Neto (2013) afirma que as principais informações para estudo do ciclo hidrológico são contempladas na bacia hidrográfica e que as características dela afetam o balanço hídrico da região, sobretudo aspectos físicos e referentes a cobertura vegetal.

A precipitação é a principal entrada de água em um sistema como uma bacia hidrográfica, sendo que, a partir dela decorrem os demais processos hidrológicos (BERTONI & TUCCI, 2001). Essa variável possui suas características regidas pelo volume de chuva (altura de chuva, normalmente em milímetros), intensidade (mm h<sup>-1</sup>) duração (min ou h) e período de retorno (em anos). Adicionalmente, as precipitações desempenham um papel significativo na perspectiva de conservação do solo, visto que os maiores volumes e intensidades de chuva, juntamente com as condições específicas do terreno pode causar impactos sob a ótica da erosão hídrica.

A interceptação superficial está relacionada à coleta da chuva pela superfície das plantas. É influenciada pelo tipo de vegetação, estágio da vegetação, tipo e quantidade dos resíduos no solo, estação do ano e velocidade do vento. Tem sua importância relacionada à absorção da energia da gota de chuva na sua queda, reduzindo a erosão no solo em função disto e, portanto, incrementando a infiltração de água no solo. Da quantidade de água que é interceptada pela vegetação, parte escorre pelo caule, outra parte goteja ao solo a partir da copa e ainda, outra fração evapora da superfície das plantas.

A evapotranspiração abrange todos os processos envolvidos na transformação de água da superfície terrestre em vapor. É obtida através da soma da evaporação de água do solo e da transpiração das plantas, esta que nada mais é que a evaporação devido a ação fisiológica das plantas. Este processo hidrológico destina uma importante fração de água que chega a bacia hidrográfica através da precipitação, ou seja, são significativas as quantidades de água perdidas por evapotranspiração, sendo algumas regiões mais significativas que outras (PINTO & BARBOSA JÚNIOR, 2010).

A cobertura vegetal do solo em áreas agrícolas desempenha um papel muito importante na disponibilidade hídrica dos mananciais, uma vez que, esta funciona como uma acceptora da água da chuva por meio do processo de interceptação. Já a detenção superficial é a lâmina de água que se acumula sobre um terreno quando este é atingido por um volume de precipitação, antes que a água comece a escoar. Esta

parcela da chuva não fica retida permanentemente na rugosidade do solo e, portanto, participa da enxurrada. Os fatores que a influenciam podem ser listados como: tipo e quantidade de resíduos sobre o solo, rugosidade do solo, declividade do terreno, manejo da área e intensidade da chuva.

A infiltração de água no solo é a passagem da água da superfície para o seu interior, sendo dependente principalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar presentes originalmente no seu interior (SILVEIRA et. al., 2007).

A infiltração é o processo hidrológico que vai definir a forma do hidrograma (gráfico que relaciona a vazão de uma dada bacia hidrográfica ao tempo). Este processo ocorre devido ao fato do solo ser um meio poroso. Sob uma determinada precipitação, há a infiltração com perdas, até que haja a saturação da superfície do solo. Conforme a saturação ocorre em maiores profundidades, a taxa de infiltração vai diminuindo até chegar a um valor residual (taxa de infiltração básica). A infiltração, bem como a percolação de água no solo são comandadas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade (SILVEIRA, 2007).

A água infiltrada que não é aproveitada pela vegetação percola até o lençol freático servindo, posteriormente para alimentar as vazões dos cursos d'água, chamado de escoamento de base (SILVEIRA, 2007).

O escoamento superficial desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico, ele alimenta os rios em período de cheia e o escoamento de base em períodos de estiagem, porém, a depender das condições do meio tende a impulsionar formação de processos erosivos, resultando em problemas indesejáveis como a perda de solo e nutrientes.

Segundo Righetto (1998), os sistemas hidrológicos podem ser analisados a partir da quantificação das entradas (vazões ou volumes afluentes) e saídas de água (vazões ou volumes efluentes), através de processos físicos determinísticos ou probabilísticos expressos matematicamente por uma ou mais funções de transferência. Por conseguinte, a partir da aplicação do princípio da conservação de massa em um sistema hídrico particular, é possível quantificar/mensurar os diversos processos envolvidos no ciclo hidrológico sob a forma de uma relação matemática denominada equação do balanço hídrico.

Nas aplicações da equação do balanço hídrico em que o volume de controle é a bacia hidrográfica, considera-se que a quantidade de entrada corresponde ao

volume da água precipitada e a quantidade de saída é dada pela soma do volume de água escoado pela seção exutória acrescida dos volumes correspondentes às perdas intermediárias, tais como a evaporação e transpiração. As quantidades infiltradas profundamente podem ser tratadas como volume de saída ou incorporadas no termo de armazenamento, que dependem do contexto de aplicação e de característica específicas (ARROIO, 2016).

Em geral, a equação básica do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser escrita da seguinte maneira (KARMANN, 2000):

$$P - ETR - Q \pm \Delta S = 0$$

Onde: P = precipitação; ETR = evapotranspiração real; Q = deflúvio e  $\Delta S$  = variação do armazenamento de água no solo, no qual as unidades comumente utilizadas estão em (mm ano<sup>-1</sup>) ou (L s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>).

A equação padrão para estimativa da evapotranspiração real, é Equação de Penman-Monteith (1948). Em que determina a evaporação de águas abertas, solo descoberto e grama (agora chamada de evapotranspiração) com base em uma combinação de um balanço energético e uma fórmula aerodinâmica.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Onde:

ET<sub>o</sub> - evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub> - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

u<sub>2</sub> - velocidade de vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>);

e<sub>s</sub> - pressão de vapor de saturação (kPa);

e<sub>a</sub> - pressão parcial de vapor (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>),

γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>).

## 4.2 Modelagem Hidrológica: Tipos e Classificação

Um Modelo Matemático (analítico ou numérico) é aquele que representa a natureza do sistema através de equações matemáticas, ou seja, o sistema físico é representado por um conjunto de expressões, compostas de variáveis e parâmetros, que são resolvidas, regra geral, com a utilização de computadores. Os modelos hidrológicos buscam descrever o comportamento de uma bacia hidrográfica, seja este comportamento referente a uma variável isolada do ciclo hidrológico ou a várias delas, em conjunto.

Os modelos hidrológicos têm sido utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas e também para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade relacionados com o regime hídrico. Uma vez que os modelos podem ser usados para prever condições futuras por meio de simulação, eles são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos. (MARINHO FILHO, et al, 2012).

De acordo com Fukunaga (2012), Zanetti (2007), Ferrigo (2011), Oliveira (2014a) e Souza (2016), existem diferentes tipos de modelos disponíveis na literatura, tais como podem ser observados no Quadro 01:

**Quadro 01-** Relação de tipos de modelos hidrológicos mais utilizados

SIGLA	DESCRIÇÃO	TRADUÇÃO
CASC2D	Cascade Two Dimensions	Cascata Duas Dimensões
CREAMS	Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System	Produtos Químicos, Escoamento e Erosão do Sistema de Gestão Agrícola
DHSVM	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model	Modelo de Hidrologia Distribuída de Vegetação do Solo
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	Calculadora de impacto na produtividade da erosão
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	Efeitos de carregamento de lençóis freáticos de sistemas de gestão agrícola
HBV-EC	Hydrologis kaBryåns Vattenbalans avdelning- Environment Canada	Balanço hidrológico do Meio Ambiente do Canadá

HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center' Hydrologic Modeling System	Sistema de Modelagem Hidrológica do Centro de Engenharia Hidrológica
HELP	Hydraulic Evaluation of Landfill Performance	Avaliação Hidráulica do Desempenho do Aterro Sanitário
HGS	Hydro Geo Sphere	Hidro Geo Esfera
Hidrobacia	Hidrograma de escoamento superficial em bacias Hidrográficas	Hidrograma de escoamentos superficial em bacias Hidrográficas
HSPF	Hydrologic Simulation Program-Fortran	Programa de Simulação Hidrológica-Fortran
InHM	Integrated Hydrology Model	Modelo Hidrológico Integrado
KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model	Modelo Cinemático de Escoamento e Erosão
MIKE SHE	European Hydrological System Model	Modelo do Sistema Hidrológico Europeu
MGBIPH	Large Basins Model	Modelo de Grandes Bacias
MODHMS (MODFLOW)	Hydrologic Modelling System	Sistema de Modelagem Hidrológica
Peak Flow Model	Peak expiratory flow measurement	Medição de pico de fluxo mensurado
PREVAH UBC-UF	Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model	Modelo de precipitação-escoamento-evapotranspiração- hidrótopo
QUAL2E	Model for water quality simulation in the GIS/DBMS environment	Modelo para simulação da qualidade da água em ambiente GIS/SGBD
QUALHYMO	QUALity HYdrologic MODEl	Modelo de balanço hídrico
SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting Model	Modelo de contabilidade de umidade do solo de Sacramento
SHE	System Hydrologic Europe	Sistema Hidrológico da Europa
<b>SWAT</b>	<b>Soil and Water Assessment Tool</b>	<b>Ferramenta de avaliação de água e solo</b>
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins	Simulador de Recursos Hídricos em Bacias Rurais
SWMM	Storm Water Management Model	Modelo de gestão de águas pluviais

TOPMODEL	Topography BasedHydrological Model	Modelo Hidrológico Baseado em Topografia
TOPOG	Simple Bucket Model	Modelo de bacia simples
UBCWM	University of British Columbia Watershed Model	Modelo de Bacia Hidrográfica da Universidade da Colúmbia Britânica
VIC	Variable Infiltration Capacity	Capacidade de infiltração variável
WaSiM-ETH	Wasserhaushalts-Simulations-Model	Modelo de simulações de Wasserhaushalts
WATFLOOD	Distributed rainfall-runoffmodel	Modelo distribuído de chuva-escoamento
WEPP	Water Erosion PredictionProject	Projeto de previsão de erosãohídrica

Fonte: Própria autora, 2023.

O SWAT é um modelo hidrológico fundamentado em características físicas de bacias hidrográficas, contínuo no tempo e com capacidade de simular longos períodos (Arnold et al., apud 2017). De acordo com esses autores, o modelo foi desenvolvido com uma estrutura de comandos capaz de dividir a área em unidades homogêneas tendo como componentes aspectos climáticos, edáficos, topográficos, vegetativos e de manejo do solo, possibilitando a simulação de escoamento, sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas.

A classificação dos modelos (Quadro 02), varia de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (MOREIRA, 2005). Dentre os muitos modelos que permitem estimar a produção de água em escala de bacia hidrográfica, destacam-se os modelos distribuídos e semi-distribuídos que analisam espacialmente.

**Quadro 02** – Classificação dos modelos hidrológicos

<b>Modelos Determinísticos</b>
São aqueles modelos que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório.
<b>Modelos Estocásticos</b>
São aqueles modelos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem têm um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.
<b>Modelos Empíricos</b>
São ditos empíricos quando sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, podendo possuir uma característica regionalista.
<b>Modelos Conceituais</b>
Os modelos conceituais são baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético, não sendo necessariamente baseado no processo real.
<b>Modelos Concentrados</b>
Nos modelos concentrados, a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características físicas relacionadas ao solo, à vegetação e à chuva. No seu desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos para toda a área de acordo com cada parâmetro do modelo.
<b>Modelos Distribuídos</b>
Estes modelos permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite a manipulação de dados de pluviometria levando em consideração sua variabilidade espacial, sendo, portanto, mais representativa do que real.

Fonte: Claker (1973, adaptado).

Assim como outros modelos (TOPMODEL, SHE, SMoRMod, WEPP etc), o SWAT permite a integração com sistemas de informações geográficas (SIG's). (JUNIOR, 2014). Porém, o modelo SWAT apresenta vantagens em relação a outros

modelos, dentre elas pode se destacar algumas de suas características. O funcionamento como modelo físico, com base na descrição dos processos naturais, ao contrário de uma abordagem de regressão estatística entre valores observados e calculados, permite uma representação mais próxima da realidade. Possibilita também ao usuário a inserção de dados de entrada baseados na realidade física da bacia em estudo.

Ele é distribuído, permitindo com isso a representação da variabilidade espacial das grandezas de influência nos processos que se desejam investigar. E possui uma associação deste ao software de geoprocessamento QGIS, através da interface ArcSWAT, que permite uma maior rapidez na organização e definição dos dados de entrada, visualização por meio de cartas digitais do terreno das características físicas da bacia e uma maior amigabilidade e compreensão do modelo.

### **4.3 Modelagem hidrológica com a ferramenta SWAT**

O SWAT é um software desenvolvido em 1998 por Dr. Jeff Arnold e o Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com a Universidade Texas A&M, com a finalidade de uso de controle ambiental, em 48 Estados dos EUA. Projetado para estudar de médias a grandes bacias com vistas a obedecer uma continuidade no tempo e, portanto, simular longos períodos.

O modelo SWAT é amplamente utilizado e reconhecido como um dos principais modelos hidrológicos para abordar questões hidrológicas e ambientais em todo o mundo (AKOKO et al., 2021). Além disso, se trata de um modelo gratuito, de código aberto (Fortran 95), capaz de diagnosticar o impacto das práticas de gestão da terra em bacias hidrográficas, com diferentes tipos de uso (BONUMÁ et al., 2015).

Este software permite entre outras coisas a simulação da produção da vazão líquida de uma bacia hidrográfica em larga escala sendo ela monitorada ou não (NEITSCH et al. 2005). Se tornando ideal para análise hídrica da bacia do Alto do Paraguaçu, Bahia.

O SWAT subdivide o ciclo hidrológico em: interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento lateral, evapotranspiração e percolação (MELO; NETO, 2013). A partir do modelo SWAT, a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal,

topografia e uso do solo. Cada sub-bacia pode ser parametrizada a partir de HRU que correspondem a um único valor de cobertura e tipo de solo. A produção de água em cada HRU é calculada com base na precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e o escoamento de retorno do aquífero raso.

O modelo opera em intervalo diário, considerando uma escala de tempo contínua, e apresenta uma boa eficiência computacional, sendo capaz de simular longos períodos para avaliar os efeitos das possíveis mudanças verificadas na bacia. Os principais componentes do modelo incluem clima, hidrologia, temperatura, e propriedades e uso do solo. (GASSMAN et al., 2007; NETO; FONTES; MEDEIROS, 2011).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, fator que tem grande influência no balanço hídrico de regiões de semiárido, o modelo oferece três opções: o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965 apud NEITSCH et al., 2011); o método de Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972 apud NEITSCH et al., 2011); e o método de Hargreaves (HARGREAVES; HARGREAVES; RILEY, 1985).

A subdivisão da bacia em áreas com combinações únicas de tipo e uso do solo (HRU) permite ao modelo refletir diferenças em evapotranspiração para diversas culturas e solos. O escoamento é calculado separadamente para cada HRU e encaminhado para obter o escoamento total da bacia hidrográfica, aumentando a precisão e fornecendo assim uma descrição física muito melhor do balanço hídrico na bacia em estudo (NEITSCH et al., 2011).

A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo para torná-lo adequado à realidade da região em estudo. Neste processo é necessário determinar os parâmetros que permitam ao modelo representar a bacia hidrográfica de forma precisa, de acordo com as observações da realidade (SOUZA, 2015). Geralmente, o processo de calibração de modelos hidrológicos começa com uma análise de sensibilidade dos parâmetros, identificando os mais importantes. Em seguida, esses parâmetros são calibrados, o que pode ser feito automaticamente, com o uso de algoritmos de otimização, ou manualmente (SALLES, 2012).

A validação do modelo é o procedimento que avalia a qualidade dos resultados obtidos por modelos, verificando a exatidão entre os parâmetros ajustados na calibração e os dados reais. No SWAT, as respostas modeladas são comparadas com os valores observados, o que proporciona uma garantia da qualidade dos resultados (SOUZA, 2015).

#### **4.4 Uso do SWAT para alterações do uso e cobertura do solo**

As mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra são intensificadas pelas atividades antrópicas, o que representa uma das principais causas de mudança nos processos hidrológicos e nas bacias hidrográficas (ROGGER et al., 2016). As alterações dos tipos de cobertura da terra e as práticas de gestão em uma bacia podem modificar significativamente o ciclo hidrológico, alterando o escoamento superficial, vazão, evapotranspiração (ET), capacidade de retenção de água do solo, interceptação e recarga de águas subterrâneas (BERIHUN et al., 2019; BOSCH e HEWLETT, 1982; COSTA et al., 2003; FOLEY et al., 2005; GARG et al., 2017; HAMMAN et al., 2018; MAO; CHERKAUER, 2009; ROGGER et al., 2016; ZHANG et al., 2014).

Dentre os trabalhos levantados na literatura referente a modelagem hidrológica utilizando o SWAT a autora Wang Y. possui a maior quantidade de artigos publicados, desde a sua primeira publicação em 2005, o que ratifica sua contribuição sobre o tema. Destaque para o artigo mais citado “Runoff sensitivity increases with land use/cover change contributing to runoff decline across the middle reaches of the Yellow River basin” que aborda como grandes mudanças no clima e uso/cobertura da terra podem afetar os processos hidrológicos e o escoamento superficial (WANG, Y; WANG, S; WANG, C; ZHAO, 2021). SERRÃO et al. (2020) e SERRÃO et al. (2021), com o propósito de compreender os processos dinâmicos de alterações no uso e cobertura da terra, utilizam análises detalhadas em escalas espacial e temporal.

#### **4.5 Aplicação do SWAT no Brasil e Estado da Bahia**

No Brasil muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando o modelo SWAT para avaliar a aplicabilidade do modelo para as regiões do país, obtendo resultados satisfatórios que comprovam que o modelo, apesar de ter sido desenvolvido em outro país (Etiópia), pode ser aplicado com grande eficiência também em território brasileiro (e.g. ARAGÃO et al., 2012; DURÃES; MELLO; LELIS et al., 2012; NAGHETTINI, 2011; NETO; FONTES; MEDEIROS, 2011). No Brasil destacam-se em uso os modelos *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), o MODHAC (modelo hidrológico autocalibrável), o Modelo de Grandes Bacias (MGB) e o modelo internacional SWAT (LOPES, 1994; LANNA, 1997; COLLISCHONN, 2001; ARNOLD, 2012).

De acordo com Brighenti et al. (2016), é possível encontrar na literatura mais de 650 artigos publicados utilizando o SWAT como ferramenta de simulação. No Brasil, entre 1999 e 2013 foram publicados 102 trabalhos que relatam a utilização do SWAT para simulação do fluxo hidrossedimentológico. O SWAT já possui algumas aplicações no Brasil e no Estado da Bahia como pode ser notado no Quadro 03.

**Quadro 03** - Quantitativos e outras citações com exemplos qualitativos do SWAT.

<b>Título e ano</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Principal resultado encontrado</b>
Aplicações Do Modelo Swat No Brasil: Revisão E Estudo De Caso – Amazônia (Souza, 2016)	Construir um panorama da utilização, e dos avanços com o SWAT na simulação de cenários em bacias hidrográficas no país.	Grande dificuldade de processamento com modelos de otimização (o SWAT-CUP), proveniente do enorme volume de dados a serem processados em bacias de grande escala, precisando de um estudo mais aprofundado das alternativas para o entendimento da calibração hidrológica.
Aplicabilidade Do Modelo Swat A Um Sistema Hidrológico Complexo De Clima Semi-Árido (NETO, et.Al., 2011)	Analisar a aplicabilidade do SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido precariamente monitorado.	Após a calibração o modelo forneceu resultados aceitáveis para a produção de vazão, quando realizados os testes estatísticos e apreciação visual dos dados de saída. Para o período de validação do modelo os resultados se mostraram satisfatórios, tanto visualmente como estatisticamente.
Aplicabilidade Do Modelo Swat Na Simulação De Vazão E Produção De Sedimentos Em Bacia Do Bioma Cerrado: O Caso Da Bacia Do Rio Das Almas, Goiás (Farias et. Al., 2018)	Testar a aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio das Almas.	O modelo conseguiu representar o comportamento hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio das Almas. A produção de sedimentos na bacia foi fortemente influenciada pelos tipos de solo, sazonalidade da precipitação e, conseqüentemente, da vazão.
Análise da ferramenta de avaliação de água e solo – SWAT+: sub-bacia do lago Tana na Etiópia (DIAS, D. E. 2019)	Demonstrar a aplicabilidade do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) por meio de uma simulação	Os resultados mostram um bom ajuste do modelo, que reflete os dados reais dentro de diferenças justificadas pelas incertezas tanto do modelo quanto das medições.

Aplicação do Modelo SWAT na Estimativa de Vazão na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (Silva et. al. 2015)	Realizar a calibração e validação do SWAT na Bacia, e análise de sensibilidade dos parâmetros associados a modelagem hidrossedimentológica.	O modelo foi sensível ao parâmetro Curva Número (Cn2) e aos parâmetros relacionados ao escoamento superficial e de base, denotando a influência do uso e da cobertura do solo.
Produção de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande Utilizando o Modelo Hidrológico SWAT (Amorim, 2016)	Estudar a produção de água na bacia hidrográfica do rio Catolé Grande, com o modelo hidrológico SWAT, e avaliar o desempenho do modelo em escala mensal.	As propriedades do solo, declividade da bacia e cobertura do solo são as variáveis que mais afetam a produção de água. O escoamento lateral e o armazenamento de água no solo são os que mais afetaram a produção de água na bacia do rio Catolé Grande.
Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model (SERRÃO et al. 2021)	Realizar um diagnóstico de vazão e produção de sedimentos, avaliar os impactos das mudanças de LULC nos últimos 40 anos na hidrelétrica -variáveis sedimentológicas, e investigar os impactos das possíveis tendências ou pontos de ruptura nas séries de vazão, escoamento superficial e produção de sedimentos.	Avaliou os impactos das mudanças históricas no uso da terra nos processos hidrológicos usando o modelo SWAT. A calibração do modelo permitiu constatar que alguns parâmetros são mais influenciados pelos processos hídricos do que outros, proporcionando a oportunidade de melhorar a simulação da bacia. Após a validação, a simulação hidrológica representou de forma eficiente a variabilidade das vazões estudadas.
Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran (AGHSAEI et al. 2020)	Analisar os impactos espaço-temporais da mudança de LULC a longo prazo nos componentes do balanço hídrico e na produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Anzali.	As principais mudanças no uso da terra na bacia hidrográfica do Anzali nos últimos 24 anos são mudanças de área florestal para área agrícola. Como a irrigação é aplicada a 70% da área agrícola, tem um grande impacto na resposta hidrológica e na perda de solo da bacia hidrográfica.

Fonte: Própria autora, 2023.

A aplicação do SWAT em bacias hidrográficas é possível tanto em áreas de tamanho pequeno, médio como em grandes áreas, como pode ser observado no Quadro 04, em que é evidenciado o tamanho de algumas bacias já analisadas, e

quando comparado com o tamanho da bacia deste estudo com a área de **2.343.920 km<sup>2</sup>** nota-se que ela está dentro da faixa de tamanho do que já foi estudado anteriormente.

**Quadro 04** – Relação de outras aplicações do modelo SWAT no Brasil e área aplicada.

<b>Autor (Ano)</b>	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Local de Aplicação</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
Duraes (2010)	Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído	Paraopeba e municípios vizinhos (MG)	10.222
Pacheco (2011)	Aplicação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-açu(SC, Brasil) Itajaí e municípios vizinhos	(SC)	15.000
Salles (2012)	Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau	Brasília (DF) e municípios vizinhos na porção norte do estado de Goiás	235
Pereira (2013)	Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT Barbacena e municípios vizinhos	(MG e RJ)	8.600
Junior (2014)	Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis Jundiá e municípios vizinhos	(SP)	1.114
Ribeiro, Bressiani & Filho (2015)	Modelagem hidrológica de vazões na Bacia Amazônica utilizando o modelo SWAT	Bacia Amazônica	6.112.000
Louzada (2015)	Modelagem hidrológica com o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Xingú	Municípios de Mato Grosso (MT) e Pará(PA)	509.000

Fonte: SOUZA, 2016.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo é composta por 02 etapas: (I) Aquisição da Base de Dados e (II) Modelagem hidrológica com o SWAT.

**(I) Aquisição da Base de Dados:** Significa captar e organizar sistematicamente todas as ferramentas de análise e informações da área de estudo, caracterizar a área de estudo, gerar os dados, e configurar para o formato de aceitação do modelo SWAT;

Para a aquisição da base de dados foi necessário os seguintes sistemas computacionais e ferramenta:

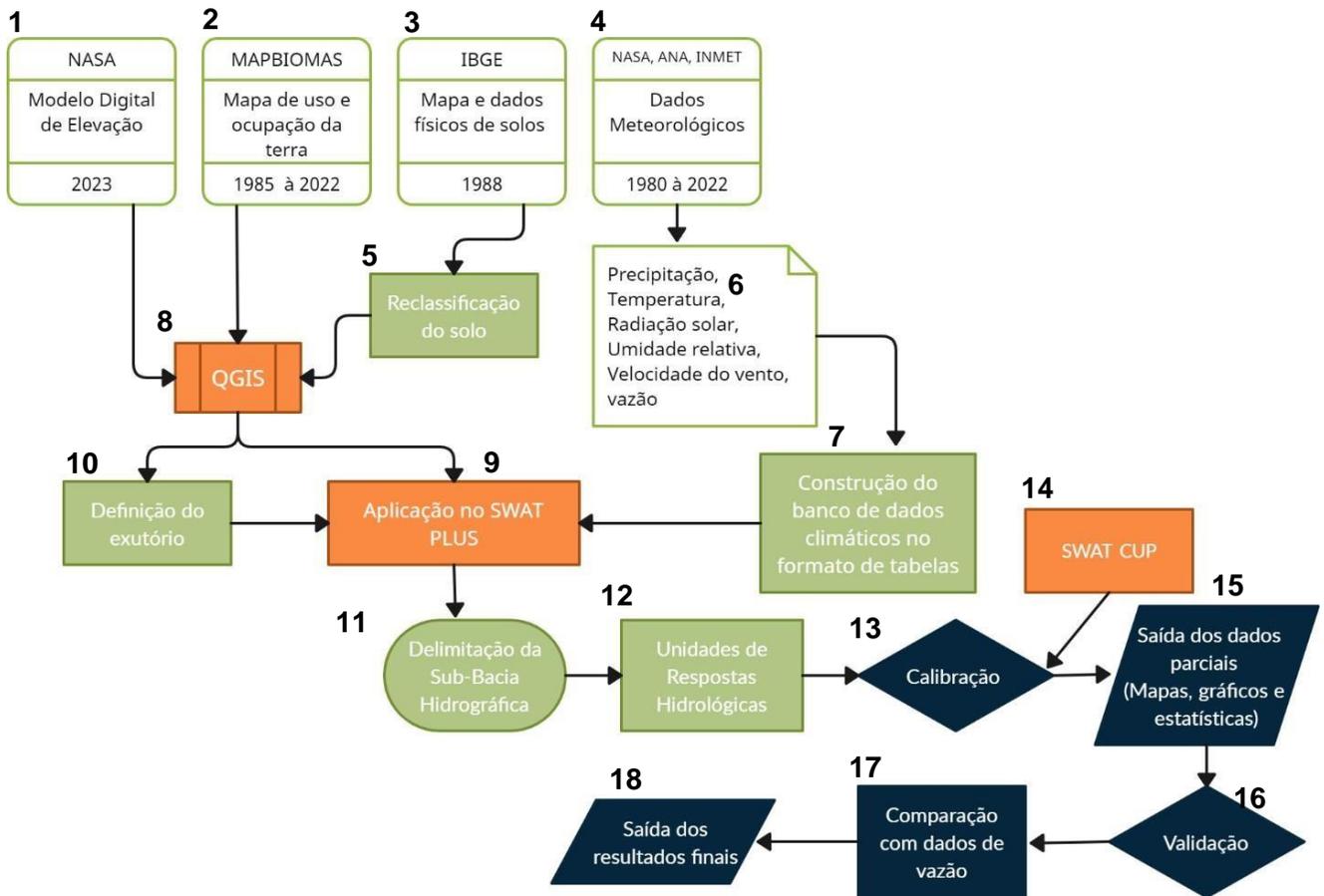
- Software QGis (versão 3.30) para a geração de dados espaciais;
- Modelo hidrológico SWAT+ Editor 2.2.0, plugin QSWAT+ 2.3.3 para a modelagem da bacia;
- Microsoft Excel (MICROSOFT EXCEL® 2010) para a tabulação dos dados e análises estatísticas;
- SWAT+ Toolbox para calibração e validação do Modelo SWAT.
- Computador com HD externo;

### 5.1 Obtenção e preparação de dados de entrada

Os dados de entrada do modelo SWAT são: MDE, Mapa de uso e ocupação da terra, Mapa e dados físicos de solos e Dados meteorológicos. Além disso, os dados monitorados de vazão também são necessários para a calibração e validação do modelo.

Através da figura 02 é possível entender de forma resumida que o SWAT não se trata de um sistema linear, mas sim de várias camadas de dados sobrepostas em que, quanto maior a riqueza de detalhes e informações melhores serão os resultados para sua leitura adequada e entrega de bons resultados, ou seja, resultados mais coerentes com a realidade. Logo, este fluxograma resume todas as informações necessárias para realizar a modelagem hidrológica com o SWAT.

**Figura 02.** Fluxograma do processo de modelagem usando o SWAT PLUS.



Fonte: Própria autora, 2023.

Através da numeração (1 a 18) do fluxograma na figura 2 é possível acompanhar a ordem de entrada dos dados começando com o MDE; mapa de uso e ocupação do solo; mapa de tipos de solos; dados hidrológicos (precipitação e vazão) e climáticos (temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar). O Quadro 05 resume todas as informações de entrada utilizadas neste trabalho com sua fonte e período de captura dos dados respectivamente.

O MDE é um dado espacial requerido pelo SWAT na fase de pré-processamento para delimitar a bacia hidrográfica e suas sub-bacias. O MDE utilizado foi através da NASADEM Global DEM, que possui resolução espacial de 30 metros, Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum SIRGAS 2000 24S, na interface do QGIS.

**Quadro 05.** Informações resumidas dos dados de entrada usados no modelo SWAT

Conjunto	Descrição	Período
Modelo Digital de Elevação	MDE de 30 metros do NASADEM	(2023)
Solo	Mapa de solo do IBGE, Livro 3603 - SD-24	(1988)
Uso e ocupação da terra	MAPBiomas de 1985 à 2021	(2016)
Dados meteorológicos	Temperatura mínima e máxima, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento (INMET)	(2016)
Pluviometria	Base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA)	(2023)
Fluviometria	ANA- Hidroweb (operadora CPRM) e CERB	(2023)
Dados meteorológicos	NASA (1985 à 2022)	(2024)

Fonte: Própria autora, 2023.

A aquisição de mapas do solo foi por meio do site do IBGE (2023), Título Secundário: Projeto RADAMBRASIL v. 24; Projeto RADAMBRASIL.; RADAM v. 24; RADAM volume 24; Salvador, folha SD. 24. Na aba de *downloads*, informações ambientais - pedologia – vetores - escala de 250 mil - versão de 2021 (a mais recente).

O mapa de uso da terra foi acessado no site do MAPBIOMAS Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MAPBIOMAS, 2021). No qual utilizou as informações dos anos de 1985 a 2022, que correspondem aos dados da Coleção 7. Com isso, torna-se possível gerar mapas para estudar as alterações do uso e ocupação da terra e analisar as variações temporais na área de estudo.

O MapBiomas é composto por uma rede colaborativa formada por ONGs, universidades e empresas de tecnologia cujo objetivo é gerar mapas anuais de uso e cobertura da terra. Os mapas são produzidos a partir de imagens do satélite Landsat, que possui uma resolução espacial de 30 m. A classificação é realizada pixel a pixel e todo o processamento é em nuvem, executado através da plataforma GEE (MAPBIOMAS, 2021). A partir de *scripts* pré-definidos, desenvolvidos pelo editor de código da plataforma GEE, são gerados mosaicos temporais, modelagem espectral de mistura e a classificação da cobertura da terra, gerando assim uma base de dados eficiente para analisar as modificações e transições do uso e ocupação da terra, bem como observar as variações no tempo para a bacia do rio Paraguaçu.

Por meio do *Google Earth Engine* (GEE) foi possível realizar o *download* do

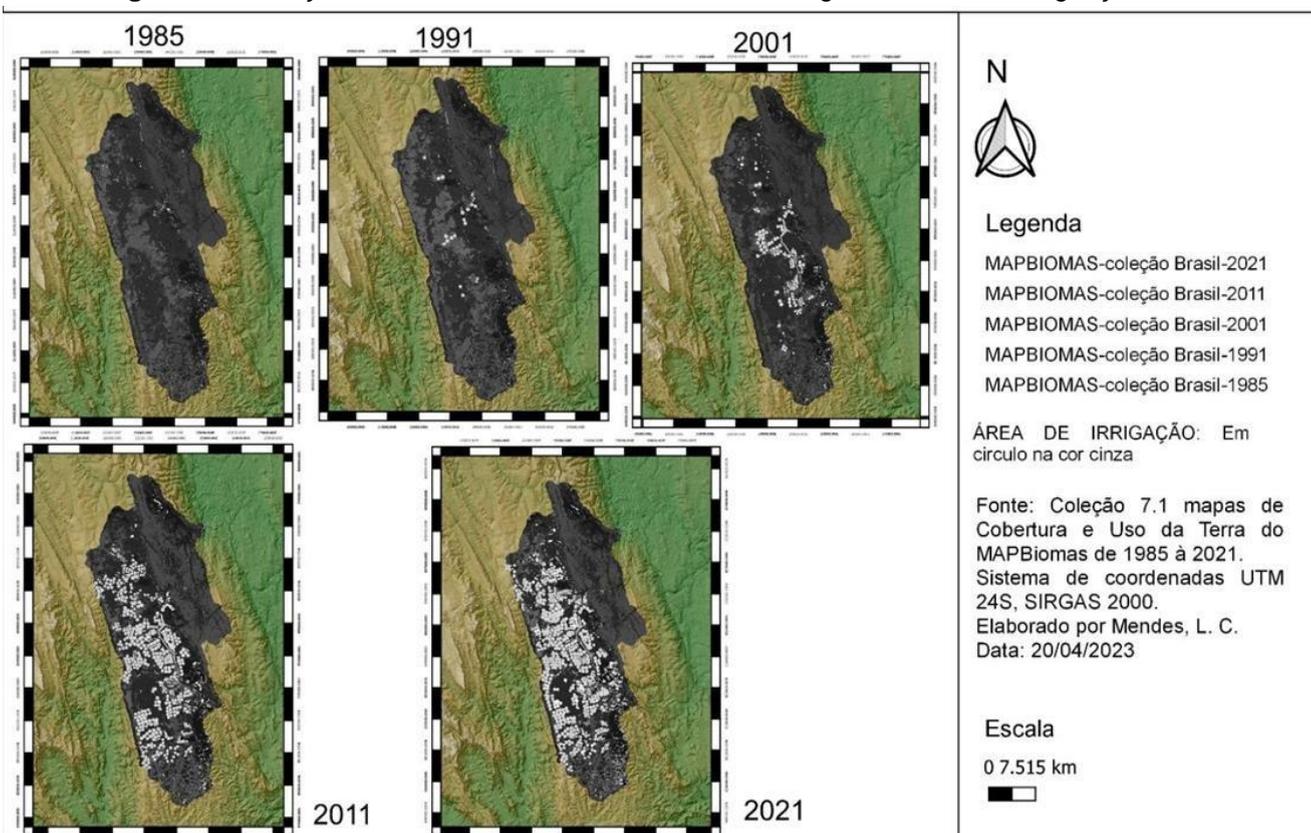
mapa de cada ano do uso e cobertura do solo da bacia do Alto do Paraguaçu, neste caso de 1985 à 2022.

O mapa de uso e ocupação do solo foi do ano de 2004, obtido através do IBGE (IBGE, 2004). Preferiu-se utilizar as informações de uso do solo de um órgão oficial, sendo este o mapa mais recente encontrado e que apresentava dados de toda a área da bacia.

É possível observar através da figura 03 uma crescente ocupação do uso do solo desde 1985 à 2021 (36 anos), com a predominância das áreas de irrigação (caracterizadas por pivôs centrais na cor cinza claro em formato de círculo). Este fato justifica ainda mais o uso da modelagem hidrológica para entender os possíveis impactos do uso e ocupação do solo nesta bacia.

A bacia está ocupada pela agricultura irrigada cujo formato espacial arredondado é típico do sistema de irrigação por pivôs centrais, instalados no entorno da barragem do Apertado.

**Figura 03.** Evolução histórica do uso da terra na Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA



Fonte: Interface do QGIS e SWAT, 2023.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) sugere que o período de observação ideal para dados climáticos seja de 30 anos sem interrupção, pois torna

possível observar com clareza os padrões pluviométricos de uma determinada região sem que haja muita discrepância caso seja realizado análises e previsões.

Os dados meteorológicos (precipitação e vazão) foram obtidos da ANA e NASA ambos diários, porém, somente os da NASA não possuem falhas de dados, pois se trata de dados estimados. Deste modo, os dados foram cruzados como um sistema híbrido, trazendo assim, uma maior confiabilidade dos dados.

As séries históricas pluviométricas (Quadro 06 e 07), escolhidas foram obtidas da rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da ANA (03 estações) e da NASA (02 estações) devido a uma maior disponibilidade de dados e a proximidade do exutório da sub-bacia.

Vale ressaltar que os dados de vazão (ANA) foram utilizados apenas no processo de calibração e validação.

**Quadro 06.** Estações pluviométricas da ANA selecionadas para a obtenção de séries históricas da bacia hidrográfica do Alto do Paraguaçu

Fonte	Código	Nome da cidade	Latitude	Longitude	Distância do exutório (m)	Período
ANA	1341029	ITUACU	- 13,81	- 41,30	107,58	1984-2022
ANA	1241033	USINA MUCUGE	- 13,01	- 41,37	19,17	1985-2022
ANA	1241032	GUINE	- 12,77	- 41,54	24,63	1984-2022

Fonte: Própria autora, 2023.

Foram obtidos os dados de temperatura do ar (máximas e mínimas), velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar pela NASA onde está inserida o trecho do alto da bacia do rio Paraguaçu, resultando num total de 2 estações climáticas. Compondo assim, os dados climáticos necessários para simulação no SWAT.

**Quadro 07.** Estações climáticas da NASA

Código da estação	Latitude	Longitude	Período
A430	-13.16	-41.77	1984-2022
83242	-12.56	-41.39	1984-2022

Fonte: Própria autora, 2023.

Os dados pedológicos exigidos no SWAT, seguem essa ordem de entrada, com esse conjunto de informações e descrição como podem ser observados na tabela01:

**Tabela 01.** Dados pedológicos usados no modelo SWAT

Variável SWAT	Descrição
SNAM	Nome do Solo
ANION_EXCL	Coeficiente de perda de ânions
SOL_CRK	Volume máximo de rachaduras no perfil de solo
TEXTURE	Classe Textural do Solo
HYDGRP	Classificação Hidrológica do Solo (A,B,C,D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima de raízes no perfil de solo(mm)
SOL_Z	Profundidade da superfície até a base do horizonte(mm)
SOL_BD	Densidade da massa úmida obs(mg/m <sup>3</sup> ou g/cm <sup>3</sup> )
SOL_AWC	Disponibilidade total de água - DTA(mm H <sub>2</sub> O/mm solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada(mm/h)
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico(% peso de solo)
CLAY	Teor de argila (% peso de solo)
SILT	Teor de silte (% peso de solo)
SAND	Teor de areia (% peso de solo)
ROCK	Teor de fragmentos de rocha(% peso de solo)
SOL_ALB	Albedo do solo úmido
USLE_K	Fator K da USLE (ton métrica m <sup>2</sup> hr)/(m <sup>3</sup> - ton métrica cm)
SOL_EC	Condutividade Elétrica do Solo

Fonte: Própria autora, 2023.

## 5.2 Caracterização Geográfica

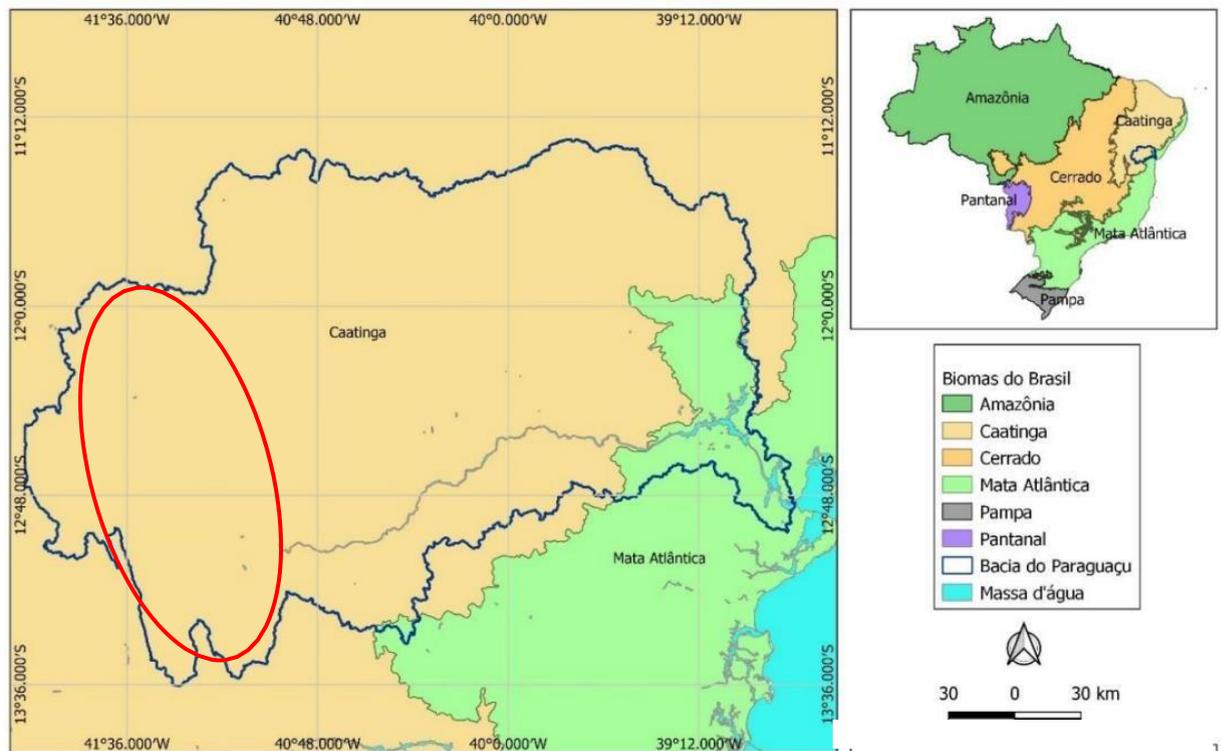
### A) Localização

A área de estudo se localiza na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Paraguaçu, possui

uma área que representa 3% da Bacia do Rio Paraguaçu e abriga as nascentes deste. Localizada entre os espigões das Serras do Sincorá e as da Borda Oriental na região da Chapada Diamantina, Bahia, a Bacia do Alto Paraguaçu tem como principal núcleo urbano o distrito de Cascavel, pertencente ao município de Ibicoara. Possui 4,1% da sua área no Parque Nacional da Chapada Diamantina e 43,4% na sua zona de amortecimento (protegem o entorno das Unidades de Conservação). Possui ainda parte de sua área em três municípios, 7,4% em Barrada Estiva, 31,1% em Ibicoara e 61,4% em Mucugê.

A BHP é subdividida em três regiões: Alto, Médio e Baixo Paraguaçu, que possui características físicas e climáticas distintas. A Figura 04 indica a Bacia do Paraguaçu delimitado em azul e o Alto Bacia hidrográfica do Paraguaçu indicado em elipse vermelha, em que é possível perceber que o Bioma predominante do Alto do Paraguaçu é a Caatinga.

**Figura 04.** Bacia hidrográfica do Paraguaçu e Bacia hidrográfica do Alto do Paraguaçu, Bahia.



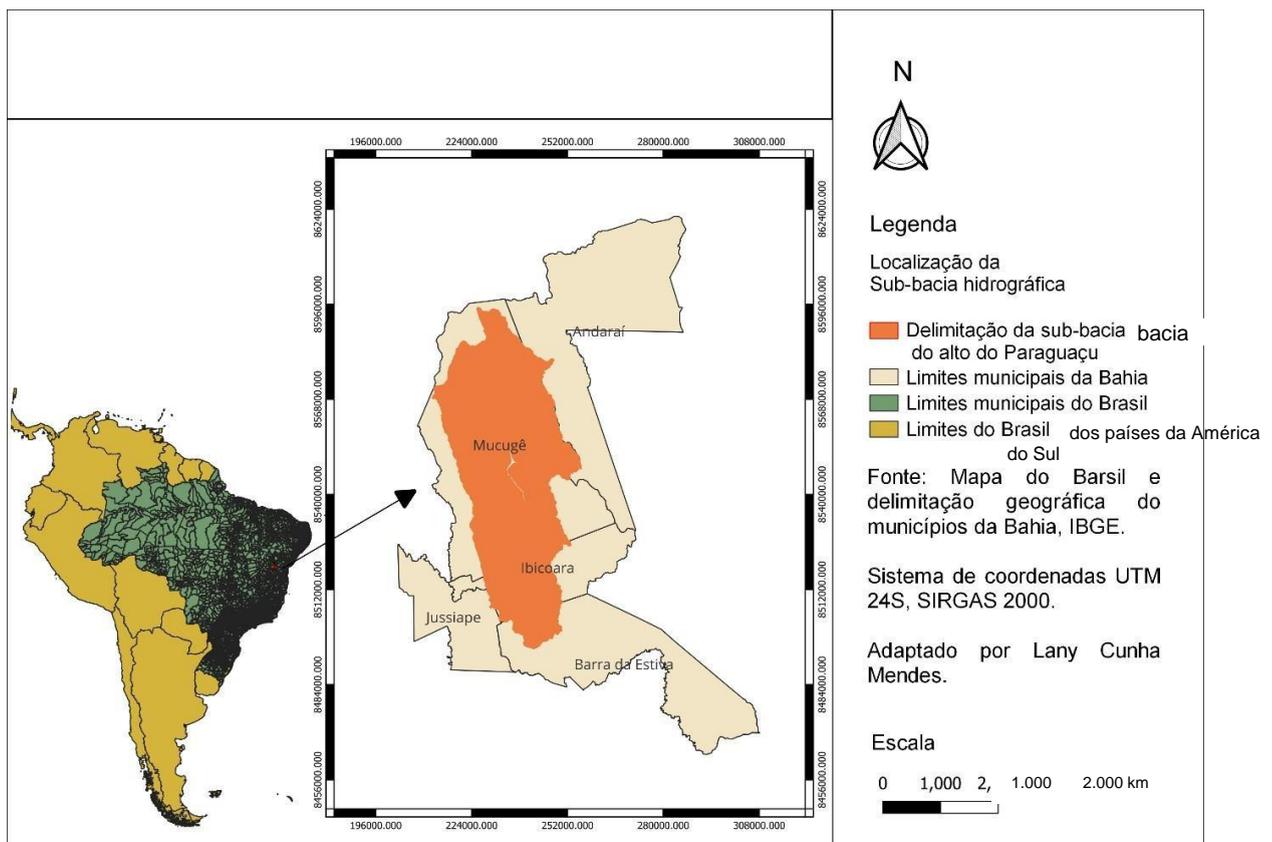
Fonte: Adaptado a ANA 2021 e IBGE 2019.

Na bacia do Paraguaçu residem, aproximadamente, 1,7 milhões de pessoas, que constituem cerca de 12,68% da população do estado (GENZ; SILVA; TANAJURA, 2012; IBGE, 2010). Os resultados do Censo Populacional destes municípios realizados pelo IBGE em 2022 retratam que em Ibicoara a porcentagem da população

situada na zona rural naquele ano era inferior à urbana (36,58%), em Mucugê, a maior parte da população (60,36 %) residia na zona rural, e em Barra da Estiva, a população rural superava a urbana em apenas 1,78%. Esses dados evidenciam a aptidão agrícola dessa região que pode ser observado com o predomínio do número de habitantes na zona rural em relação à zona urbana, com exceção para o município de Ibicoara.

A Figura 05 representa a localização desta Bacia com os municípios que fazem parte da bacia e vizinhos, em frente às informações do PERH/BA (2012) e do Plano Diretor de Recursos Hídricos Bacia Hidrográfica do Alto Paraguaçu (2007) elaborado pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu (2007).

**Figura 05.** Localização da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA



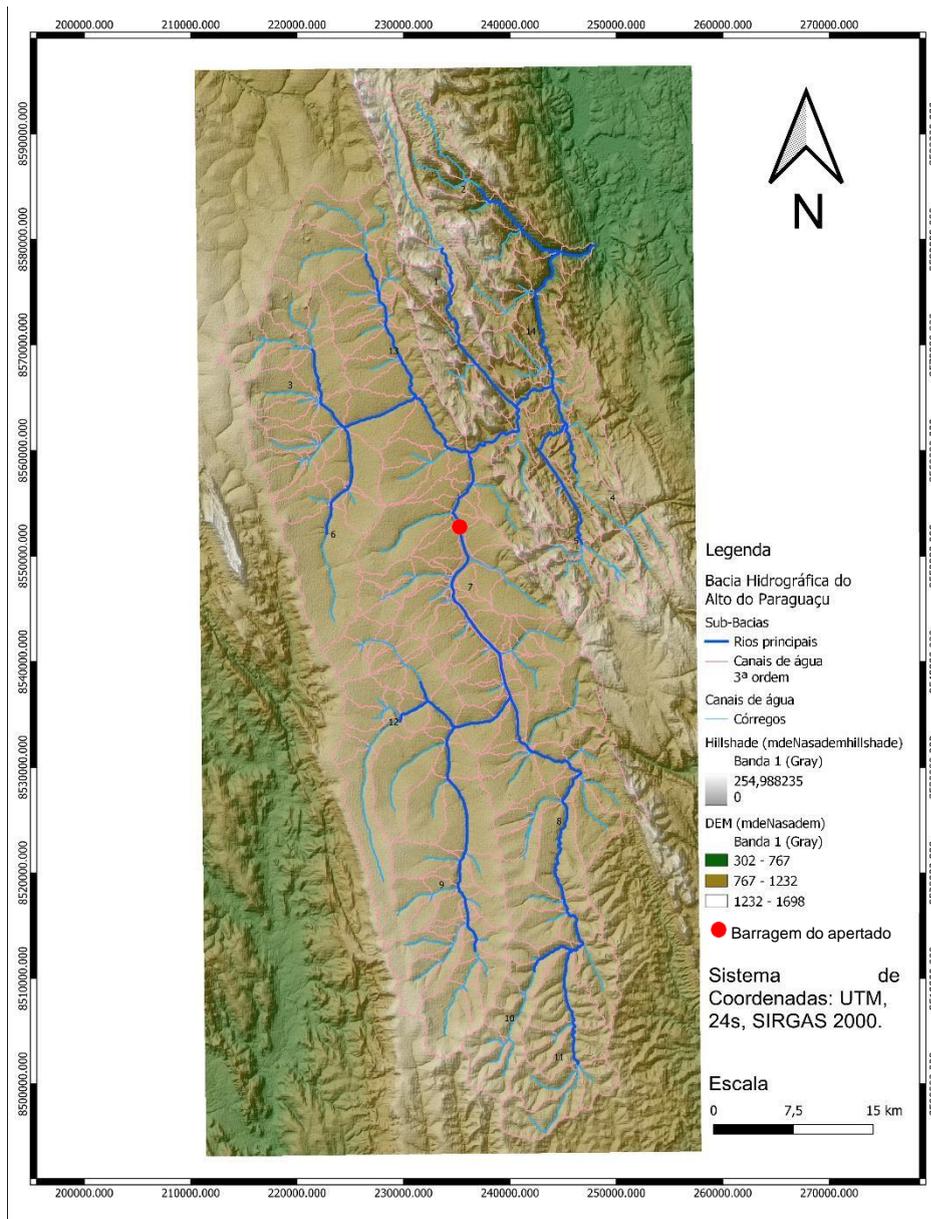
Fonte: Interface do QGIS e SWAT, MENDES, I. C., 2023.

## B) Hidrografia

Os afluentes principais da Bacia do Paraguaçu são os rios Jacuípe, Capivari, Cumbica, Cochó, Bonito, Santo Antônio, Utinga, Serrano, Preto, Una e do Peixe. No Alto do Paraguaçu há a presença de alguns rios perenes - beneficiada pela presença do rio Paraguaçu e seus principais afluentes (os rios Utinga e Santo Antônio)

(FERNANDEZ, 2001), como é possível notar na Figura 06 em azul-escuro os rios principais e em azul mais claro os córregos, e em rosa os canais de 3ª ordem. Em círculo vermelho está representada a barragem do Apertado.

**Figura 06.** Delimitação dos rios principais, secundários e terciários, e Barragem do Apertado da bacia do Rio Paraguaçu, BA



Fonte: Interface do QGIS e SWAT, MENDES, I. C., 2023.

O Rio Paraguaçu nasce no município de Barra da Estiva e desagua na Baía de Todos os Santos (SRH, 2004). Destaca-se na bacia a presença de grandes reservatórios, como Apertado, Bandeira de Melo, França, São José de Jacuípe e Pedra do Cavalo (ANDRADE, 2010).

A Barragem do Apertado está implantada no alto trecho do rio Paraguaçu, localizada nas coordenadas geográficas 13° 04' 45" S e 41° 26' 35" W, no município de Mucugê, distando aproximadamente 26 km da sede deste município e cerca de 480 km da capital baiana. Sua construção foi finalizada em julho de 1998 pela CERB, com o objetivo principal de atender as demandas hídricas do setor usuário da irrigação (LOPES et al., 2008).

### **C) Geologia e solos**

A área de estudo possui declividade baixa com predomínio do relevo suave plano, de origem sedimentar e cobertura pedológica dos Latossolos. A vegetação predominante é a de Cerrado, na fisionomia de Campo Cerrado (Gerais) (IBGE, 2021).

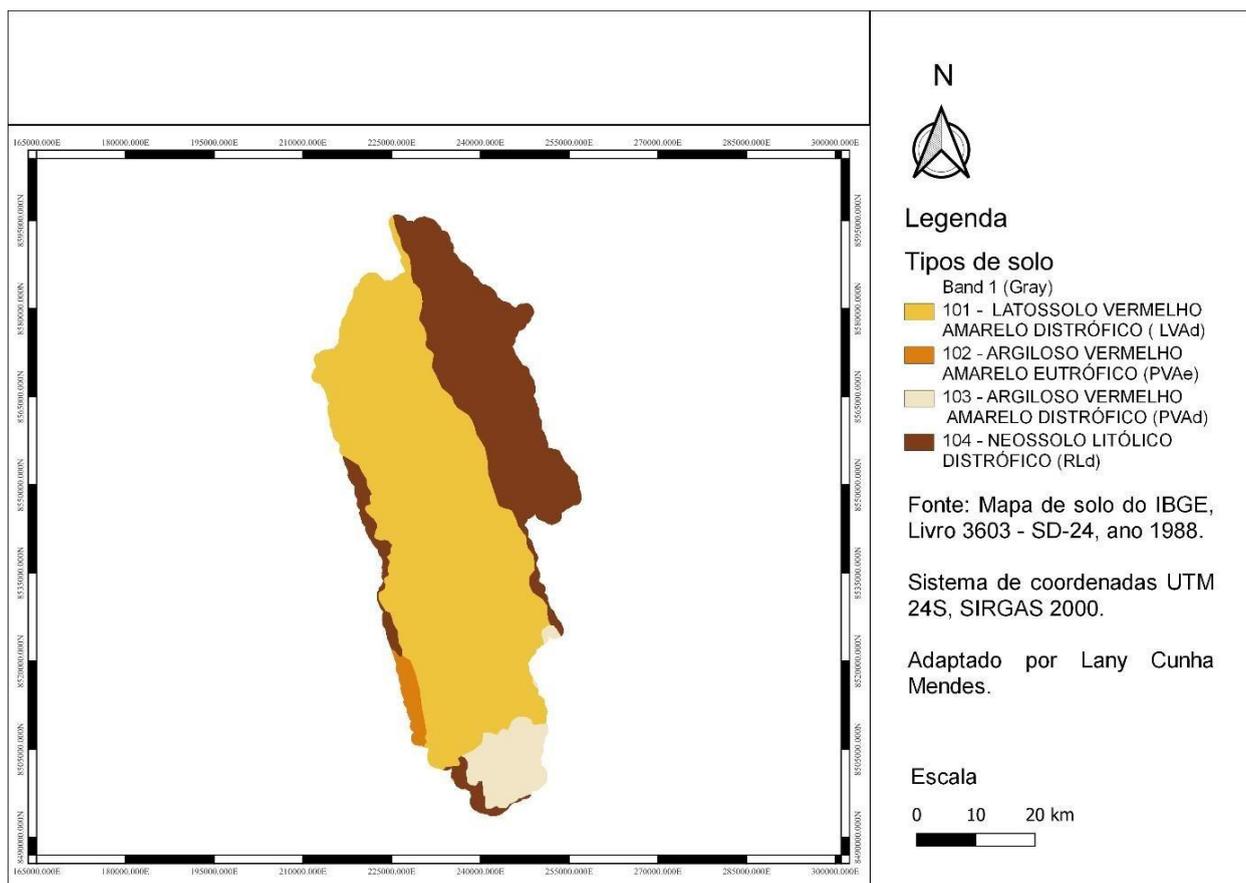
A topografia predominante é plana e as terras tem boa qualidade a baixo custo. Essas características têm levado produtores a introduzir a irrigação através de pivôs centrais, estabelecendo um ritmo preocupante de crescimento da demanda por água para irrigação (FERNANDEZ, 2001).

A formação dos solos na região é sobretudo influenciada pela litologia (tipo de rocha). A cada unidade geológica tem um solo diferente. Possui um substrato geológico composto por rochas magmáticas e metamórficas (INEMA, 2021).

- ENdl - Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas, do Neogeno, dando geralmente origem à Latossolos
- PP4rr – Metarenito eólico com níveis metapelíticos, Grupo Rio dos Remédios, do Paleoproterozóico, dando geralmente origem à Argissolos
- MP12t – Metaquartzarenito, Formação Tombador, do Mesoproterozóico, dando geralmente origem à Neossolos

Em relação aos tipos de solo, o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico predomina em relação aos outros tipos de solo (Figura 07). Em grande medida esse tipo de solo serve de suporte para a prática da atividade agrícola. Apresentando uma elevação mínima de 337 metros, e uma elevação máxima de 1.698 metros.

**Figura 07.** Mapa de classes de solos da bacia do alto Paraguaçu



Fonte: Adaptado ao IBGE na interface do QGIS, 2023.

## D) Clima

A classificação climática de Koppen, atualizada por Alvares et. al (2013), da região da bacia do alto do Paraguaçu se resume ao seguinte cenário (Tabela 02).

**Tabela 02.** Classificação climática Koppen atualizada por Alvares

<b>Cwa</b>	Clima subtropical de inverno seco
<b>Cfa</b>	Clima subtropical, com verão quente
<b>Cwb</b>	Clima subtropical de altitude
<b>Cfb</b>	Clima temperado, com verão ameno
<b>Aw</b>	Clima tropical, com inverno seco

Fonte: Própria autora, 2023.

Predomina na bacia: Cfb (Clima temperado, com verão ameno. Chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca e a temperatura média do mês mais quente não chega a 22°C. Precipitação média anual de 1.100 a 2.000 mm.

Cwb (Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno. A

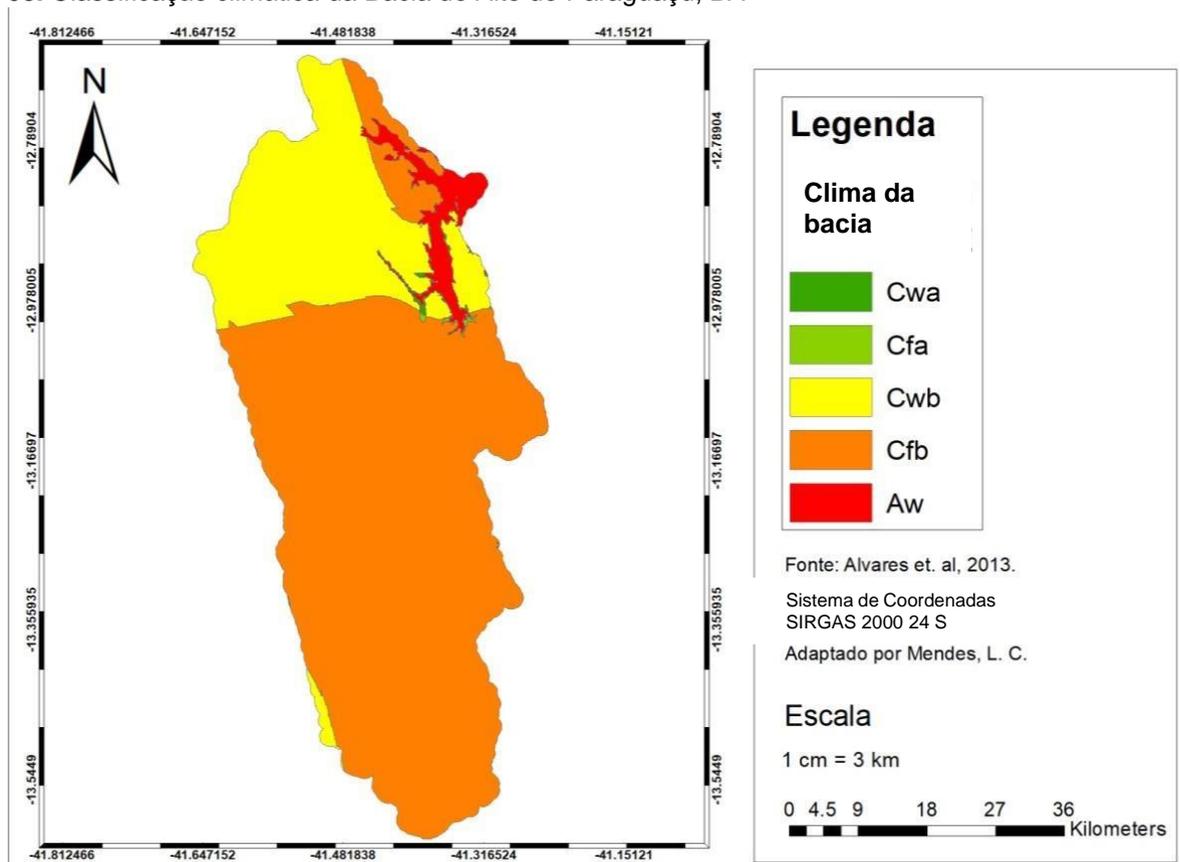
temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C).

Aw (Clima tropical, com inverno seco, apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C. Precipitação superior a 750 mm anuais, atingindo 1800 mm).

Cwa (Clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C).

Em com a menor distribuição Cfa (Clima subtropical, com verão quente. As temperaturas são superiores a 22°C no verão e com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco). Através da figura 08 é possível visualizar a distribuição climática com mais facilidade ao longo da bacia.

**Figura 08.** Classificação climática da Bacia do Alto do Paraguaçu, BA



Fonte: Adaptado pela própria autora na Interface do ARCGIS, 2023.

## E) Vegetação

Os biomas presentes nesta bacia variam desde a transição entre Caatinga e Mata Atlântica, a Caatinga com manchas de floresta estacional (CARELLI; SANTO, 2016). A cobertura vegetal predominante é de florestas estacionais e campos

rupestres.

A área de estudo é composta por diversos tipos de cobertura vegetal, que de um modo geral podem ser diferenciadas em vegetação nativa e agropecuária. As coberturas responsáveis por ocupar as maiores superfícies são advindas da atividade Agropecuária, o Cerrado e a Caatinga Arbórea/Arbustiva. Outras categorias como Campo Limpo, Campo Rupestre e Floresta Estacional representam áreas menores na área de estudo (MAPBIOMAS, 2021).

Houve um avanço das atividades da agricultura irrigada no período compreendido entre os anos de 1987 e 2008, e isso contribuiu para a redução da vegetação nativa de cerrado e da mata ciliar (BORGES, et al. 2009). Mucugê ocupou a primeira posição do ranking entre os municípios que mais sofreram com supressão da vegetação nativa entre os anos de 2008 e 2009 com uma área desmatada de 59,02 km<sup>2</sup>, o equivalente a 2,27% da área total do município (MMA, 2011).

No que se refere a vegetação nativa, na atualidade a faixa marginal da APP do Lago do Apertado encontra-se em desconformidade com o disposto no artigo 4<sup>o</sup>, inciso II, alínea “a” da Lei 12.651/2012 (Novo Código Florestal), que dispõe entre outros sobre a proteção da vegetação nativa. Esta lei determina que os reservatórios d'água artificiais localizados em zonas rurais, como no caso da Barragem do Apertado, devem possuir uma faixa marginal com largura mínima de 30 (trinta) metros, podendo esta ser coberta ou não por vegetação nativa.

**(II) Modelagem hidrológica com o SWAT:** Delimitação das sub-bacias, compreender a análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração com o programa SWAT-CUP, verificação e análise dos resultados para efeito de comparação.

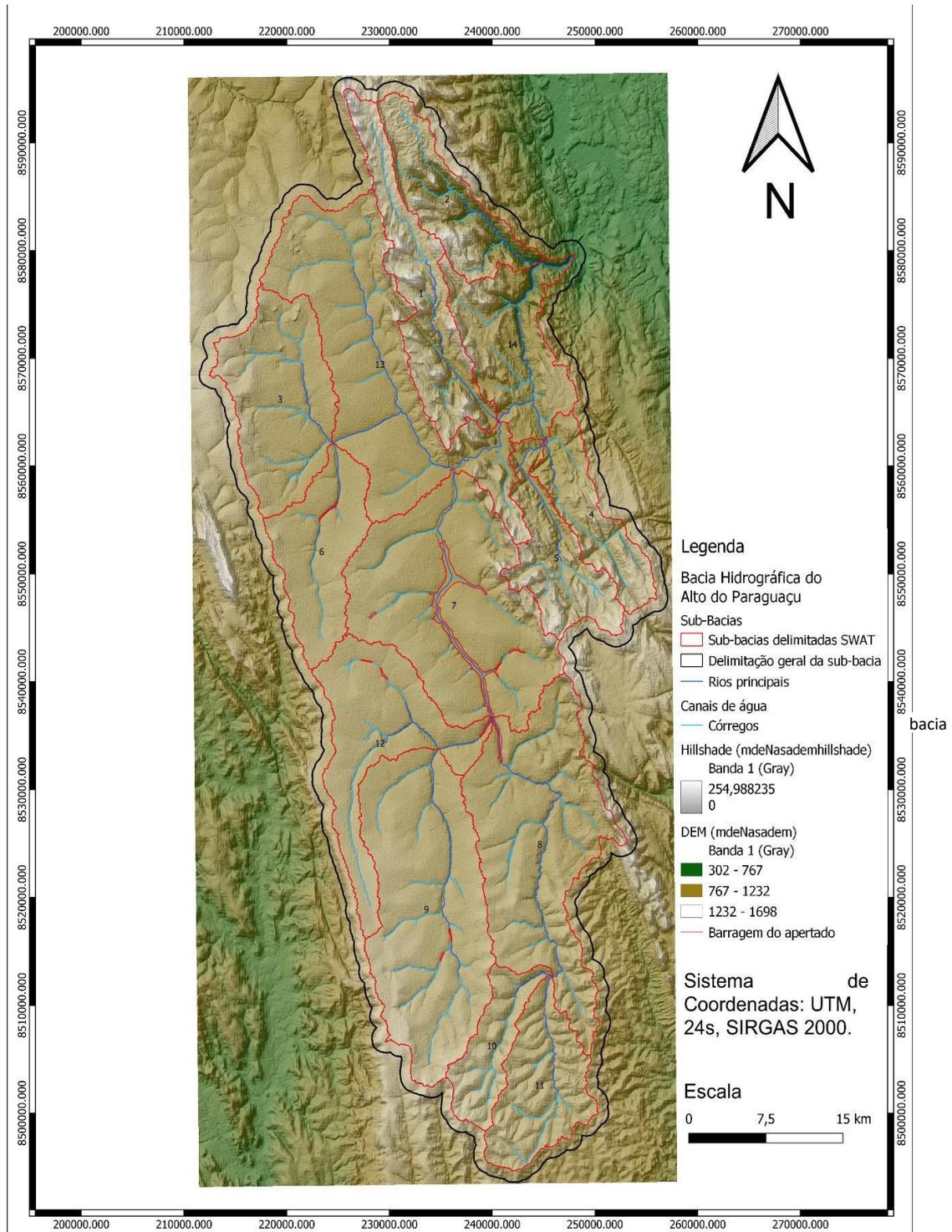
### **5.3 Delimitação das sub-bacias hidrográficas**

O método de delimitação das sub-bacias hidrográficas baseado no MDE foi aplicado no QSWAT+, o construtor de modelos SWAT do ambiente QGIS. A camada de topografia (MDE) é a primeira a ser inserida no QGIS para iniciar a modelagem hidrológica, pois através do recorte da área de interesse somado a rede hidrográfica da bacia se inicia a delimitação. Em seguida é escolhido manualmente o ponto de exutório através do plugin do QSWAT+ no QGIS para gerar as sub-bacias, e neste momento também é possível unir as sub-bacias de forma manual.

Na Figura 09 estão representadas em cima de um modelo digital de elevação,

na cor preto a delimitação da Bacia Hidrográfica do Paraguaçu escolhida para este estudo, bem como as sub-bacias delimitadas pelo SWAT em vermelho, e os rios (drenagem) das sub-bacias em azul.

**Figura 09.** Delimitação da bacia do Alto do Paraguaçu, BA e Sub-bacias com rede de drenagem através do SWAT.

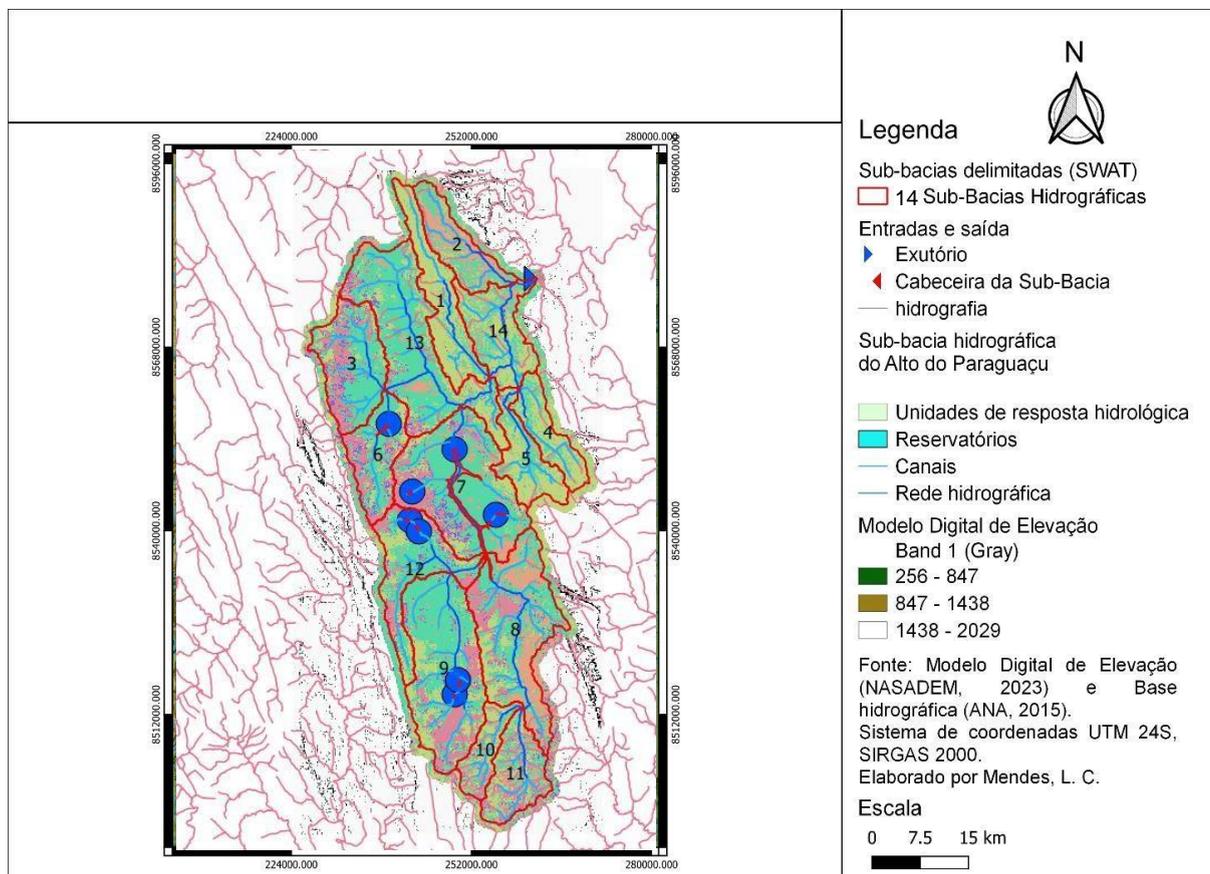


Fonte: Interface do QGIS e SWAT, MENDES, I. C., 2023.

O exutório representado pelo triângulo em azul na Figura 10 é o ponto do curso d'água onde se dá todo o escoamento superficial gerado no interior da sub-bacia hidrográfica banhada por este curso. O exutório do curso principal coincide com o ponto mais inferior para onde converge toda a descarga hídrica desta bacia.

A Figura 10 além de identificar as 14 sub-bacias hidrográficas delimitadas na cor vermelho, mostra os reservatórios em círculos azuis. Vale ressaltar ainda que o processo de identificação da rede de riachos e sub-bacias e o cálculo de seus atributos são conhecidos como delimitação de bacias hidrográficas.

**Figura 10.** Delimitação das Sub-Bacias hidrográficas do Alto Paraguaçu, BA



Fonte: Interface do QGIS e SWAT, 2023.

O Quadro 08 resume as informações desta bacia estudada gerada pelo SWAT, em que é apresentado a quantidade de 8 reservatórios, mesmo conhecendo que o principal reservatório da região é o da Barragem do Apertado, há a presença de outros reservatórios. Além do período de simulação de 1984 a 2021, ou seja, antes desse período provavelmente não tinha mais reservatórios.

**Quadro 08.** Informações geradas da bacia do Alto do Paraguaçu

Área total da sub-bacia do Alto do Paraguaçu	234.392,52 ha
Período de simulação	1984 - 2021
Sub-bacias	14
HRUs	2377
Canais	227
Aquíferos	15
Reservatórios	8
Unidades de Roteamento	265
Unidades de paisagem	265
Recuperação (dados pontuais de origem/entrada)	227

Fonte: SWAT editor, adaptado por Mendes, L. C., 2024.

#### **5.4 Geração de Unidades de Respostas Hidrológicas**

A subdivisão das sub-bacias ocorre através do método da HRU dominante, onde para cada uma das sub-bacias o modelo atribui apenas uma HRU. Este processo resultou em um total de 14 sub-bacias na bacia hidrográfica do alto do Paraguaçu, vale ressaltar que é levado em consideração a topografia da área com elevação mínima de 337 metros, elevação máxima de 1.698 metros, e elevação média de 1.140,77m e a rede hidrográfica inserida anteriormente no QGIS.

#### **5.5 Dados climáticos**

A produção das estatísticas mensais no SWAT Editor requer a inclusão dos seguintes dados de entrada em formato de planilha em excel, completando as falhas com o número "-99". O swat editor exige que as seguintes informações climáticas apresentadas no quadro 09 estejam nesta ordem e com essas unidades para a devida simulação.

A Figura 11 mostra um print da entrada dos dados climáticos (03 de precipitação da ANA) que contaram com um ajuste automático do SWAT Editor, e (02 estações climáticas da NASA).

**Quadro 09.** Informações da simulação no SWAT editor.

Precipitação (mm)	Temperatura (°C)	Radiação Solar (MJ/ m²/dia)	Umidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (m/s)
Média da precipitação total	Média da temperatura máxima	Média diária da radiação solar	Média diária do ponto de orvalho	Média da velocidade do vento
Média de dias de chuvosos	Média da temperatura mínima			
Desvio padrão da média diária	Desvio padrão da temperatura máxima			
Coeficiente de assimetria da média	Desvio padrão da temperatura mínima			
Chuva máxima de 30 min				
Probabilidade de ocorrência de um dia chuvoso após um dia seco				
Probabilidade de ocorrência de um dia chuvoso após um dia chuvoso				

Fonte: Própria autora, 2024.

**Figura 11.** Resumo das estações climáticas selecionadas

NAME	WGN	PRECIPITATION	TEMPERATURE	SOLAR RADIATION	REL. HUMIDITY	WIND SPEED	WIND DIR
1241032	126s416w	1241032pcp.pcp	sim	sim	sim	sim	null
1241033	130s412w	1241033pcp.pcp	sim	sim	sim	sim	null
1341029	139s412w	1341029pcp.pcp	sim	sim	sim	sim	null
83242	126s412w	83242pcp.pcp	83242tmp.tmp	83242sol.slr	83242rhmd.hmd	83242wind.wnd	null
A430	133s419w	A430pcp.pcp	A430tmp.tmp	sim	A430rhmd.hmd	A430wind.wnd	null

Fonte: Interface do SWAT Editor, 2024.

## 5.6 Calibração e Validação do Modelo SWAT

O objetivo da calibração SWAT é minimizar os desvios entre as variáveis simuladas e medidas. O processo de ajuste automático facilita essa tarefa ao utilizar técnicas avançadas de cálculo que permitem alterar parâmetros pré-selecionados dentro de uma determinada faixa de valores. A calibração também pode ser facilitada

pelo grau de influência dos parâmetros do modelo sobre a variável simulada. Para tanto, a análise de sensibilidade pode ser utilizada para descobrir os parâmetros que mais afetam o modelo e sua significância nos resultados gerados.

A etapa de validação dos ajustes realizados nos parâmetros serve para executar o modelo com os valores dos parâmetros determinados na calibração para um período de dados diferente ao utilizado na calibração (ARNOLD et al., 2012). A partir disso o modelo pode ser considerado adequado para a simulação do fluxo hidrosedimentológico na bacia. Após todos os dados necessários serem carregados no modelo, se faz necessário definir o período de simulação e a saída fornecida em intervalo de tempo diário, mensal ou anual. Neste estudo a calibração aconteceu de forma manual e o intervalo de tempo foi anual.

Para avaliar o desempenho do SWAT foram utilizadas as estatísticas de precisão, como: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), e o Coeficiente de Massa Residual (CMR). A correlação perfeita entre dados simulados e observados é expressa por um valor de  $NSE = 1$ , por exemplo.

Através do Quadro 10 é possível entender os critérios de avaliação do desempenho do modelo SWAT, que vai de muito bom a insatisfatório, e através das fórmulas há uma validação dos dados reais com os dados obtidos do modelo.

- $R^2$  (R-Dois) Coeficiente de determinação: percentual da variância dos dados, ou seja, quanto mais perto de 1 o valor obtido pela fórmula melhor (mais próximo da realidade), mais perto de 0 pior (mais distante da realidade).

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio): indica a raiz quadrada da diferença média ao quadrado entre os valores previstos e os valores reais num conjunto de dados;

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - X_i)^2}{n}}$$

- PBIAS (Coeficiente Percent BIAS): Percentual de tendência - mede a tendência dos dados simulados a serem maiores ou menores do que os dados observados;

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^n X_i} \times 100$$

**Quadro 10.** Métodos estatísticos para verificação dos resultados do modelo SWAT.

<b>Critério de Avaliação do Desempenho</b>					
<b>Coeficiente</b>	<b>Muito Bom</b>	<b>Bom</b>	<b>Satisfatório</b>	<b>Insatisfatório</b>	<b>Faixa de Variação</b>
R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> > 0,85	0,75 < R <sup>2</sup> ≤ 0,85	0,60 < R <sup>2</sup> ≤ 0,75	R <sup>2</sup> ≤ 0,60	-1 a 1
NSE	NSE > 0,80	0,70 < NSE ≤ 0,80	0,50 < NSE ≤ 0,70	NSE ≤ 0,50	-∞ a 1.0
PBIAS (%)	PBIAS < ±5	±5 ≤ PBIAS < ±10	±10 ≤ PBIAS	PBIAS ≥ ±15	-∞ a ∞

Fonte: Adaptado Moriasi et al. (2015).

Antes de realizar a calibração, é recomendado executar o modelo em um período anterior para reduzir as incertezas no início das simulações devido à falta de conhecimento das condições iniciais (ANDRADE et al., 2013). Essa etapa é conhecida como aquecimento do modelo ou período de equilíbrio. Não há uma definição precisa sobre a duração desse período, mas de acordo com Neitsch et al. (2005), é recomendado pelo menos um ano para que o modelo alcance o equilíbrio.

A fase de aquecimento desempenha um papel crucial para reduzir a instabilidade causada pelo crescimento das plantas, na umidade inicial do solo e armazenamento de água no aquífero. Durante esse período, os dados de saída não são levados em conta para o cálculo das médias anuais das variáveis de saída e não são utilizados na calibração e validação do modelo.

Alguns trabalhos utilizaram um período de aquecimento de 2 anos, sendo que o intervalo de aquecimento consistiu dos dois primeiros anos do período selecionado para a calibração (SOUZA, 2016). Outros optam para um período de 5 anos para aquecimento do modelo, um período de dez anos para calibração (1996 a 2006) e um período de cinco anos para validação (2007 a 2011) (EMBRAPA, 2016).

Para este trabalho foram usados 02 anos de aquecimento, e foram necessários oito parâmetros principais para simular os processos hidrológicos da bacia do alto do Paraguaçu.

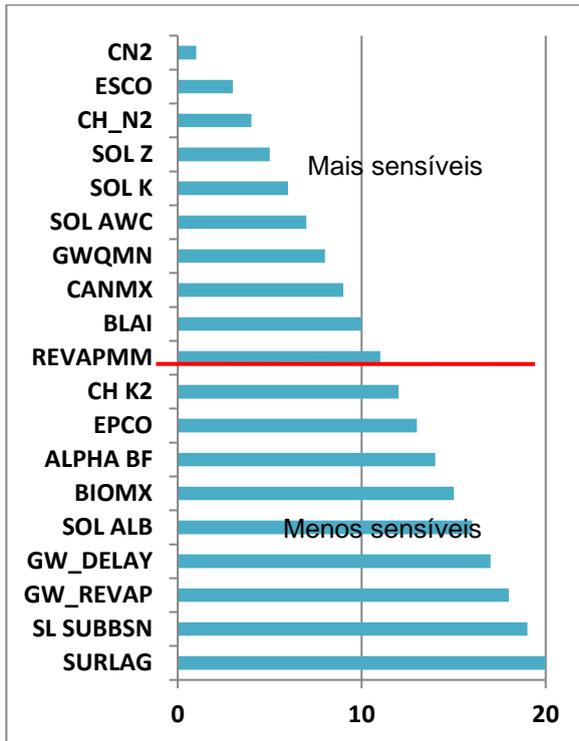
De acordo com alguns trabalhos os parâmetros que exercem maior influência estão relacionados a recarga de águas subterrâneas, evapotranspiração, escoamento lateral, escoamento superficial e profundidade dos solos. O CN2 (método do número da curva para a condição de umidade AMC II). A forte influência desse parâmetro

também foi relatada por diversos autores (Santos et al., 2018; Nyatuame et al., 2020; Sousa et al., 2020). Este parâmetro corresponde ao escoamento superficial e está diretamente ligado aos picos na vazão, sendo que maiores valores do parâmetro CN proporcionam picos de vazão na hidrógrafa. Em seguida, GW\_DELAY (intervalo de tempo para recarga do aquífero em dias) e ALPHA\_BF (constante de recessão do escoamento de base em dias) que expressam forte relação aos processos hidrogeológicos. Isso pode ocorrer pois o tipo de solo dominante desta sub-bacia analisada é o latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico que são profundos (MARTINS, 2020).

Paz et al. (2018) justificam a alta sensibilidade dos parâmetros relacionados às águas subterrâneas, solo e cultura devido a sua influência nos componentes do ciclo hidrológico. Essa influência por sua vez, é dada de acordo com as características edafoclimática, fisiográficas e ações antrópicas nas bacias hidrográficas. O parâmetro ESCO corresponde ao processo de evapotranspiração. Altos valores deste parâmetro significam maiores quantidades de água transferida para a atmosfera pelos processos físicos das plantas. Observa-se que este parâmetro apresenta altos valores tanto na etapa de calibração e validação do modelo.

As variáveis que mais apresentaram sensibilidade quanto à vegetação, manejo do solo, pedologia (solos), clima, aquíferos, canais e reservatórios, utilizados na modelagem da bacia do Paraguaçu foram as seguintes: Alpha\_Bf: Constante de recessão do escoamento de base (dias); Canmx: Armazenamento máximo do dossel (mm H<sub>2</sub>O); Ch\_K: Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h); Ch\_N: Coeficiente de rugosidade de Manning; CN2: Curva-Número para a condição de umidade; Epc: Fator de compensação de água pelas plantas; Esco: Fator de compensação de evaporação do solo; Gw\_Delay: Tempo de retardo da água subterrânea (dias); Gw\_revap: Coeficiente "revap" de água subterrânea; Gwqmn: Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície; Revapmn: Profundidade de água limite em aquífero raso para que ocorra "revap" (mm H<sub>2</sub>O); Slsbbsn: Comprimento da declividade média (m); Sol\_Alb : Albedo do solo úmido; Sol\_Awc: Teor de umidade disponível nas camadas do solo (mm); Sol\_K: Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h); Sol\_Z: Profundidade do solo (mm) e Surlag: Coeficiente de retardo do escoamento superficial. O gráfico 01 mostram as variáveis mais sensíveis como a CN e as menos sensíveis como a Surlag.

**Gráfico 01.** Ranking dos parâmetros obtido com a análise de sensibilidade



Fonte: Própria autora, 2023.

Para este trabalho são 40 anos de dados mensais no total, nos quais foram divididos da seguinte forma: 2 anos para aquecimento do modelo (1984 à 1986), 20 anos para calibração (1987 à 2006), e 14 anos para validação (2007 à 2021). Desta forma são 36 anos de 1985 à 2021.

O ajuste dos parâmetros foi feito manualmente de montante para jusante, iniciando no postofluviométrico mais a montante na bacia e terminando no posto mais a jusante. Posteriormente realizou-se a calibração para o posto fluviométrico.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O PBIAS que é o índice que sinaliza os desvios entre as vazões simuladas e observadas. Os valores negativos e positivos do PBIAS indicam, respectivamente, a superestimação ou subestimação da modelagem. Neste estudo, o índice PBIAS classifica o modelo como muito bom devido a sua variação de -0,16 a 2.03 para os três períodos simulados (Quadro 11). Já os valores do coeficiente de determinação variaram entre 0,34 e 0,67, sendo classificados como satisfatórios para os três períodos de calibração e bom para os períodos de validação.

**Quadro 11.** Resultados da calibração e validação do modelo SWAT para os diferentes períodos considerados.

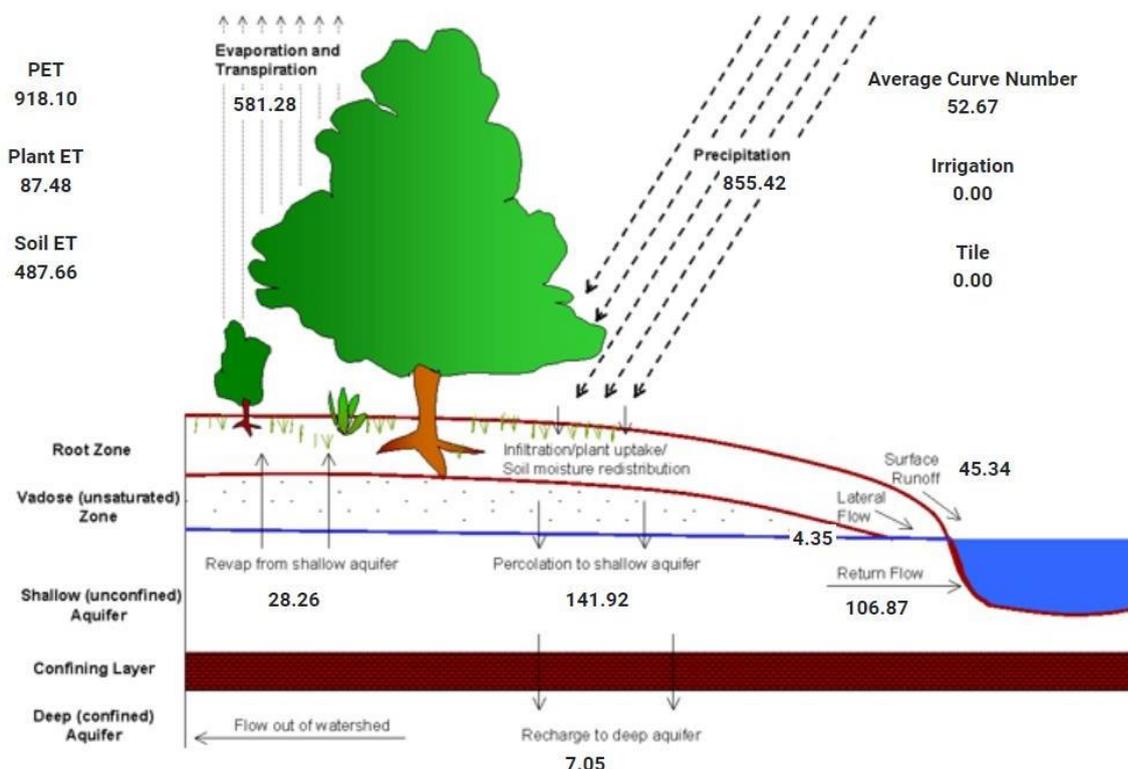
Processo	Período	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)			Estatística Mensal		
		Observado	Simulado	Percentual de Variação (%)	NSE	PBIAS	R <sup>2</sup>
Aquecimento	1984-1986	22.73	22.09	-2.76	0.60	-0.16	0.62
Calibração	1987-2006	16.74	16.17	-3.36	0.77	-0.86	0.34
Validação	2007-2021	13.88	15.07	8,63	0.58	2.03	0.67

NSE – Coeficiente de Nash Sutcliffe; PBIAS- Correção de Viés; R<sup>2</sup>- coeficiente de determinação

Fonte: Própria autora, 2024.

Um dos primeiros resultados que o SWAT Editor entrega é uma imagem com valores das proporções de cada fase do balanço hídrico, além do gráfico de sedimentos e uso e distribuição da terra, como pode ser observado na figura 11. E no quadro estão os valores da razão entre algumas variáveis do ciclo hidrológico como a relação de percolação e infiltração de 0,17 que é menor do que a relação entre escoamento superficial e fluxo total de 0,29.

**Figura 11.** Proporções hídricas em milímetros para esta bacia



Fonte: SWAT Editor, 2023.

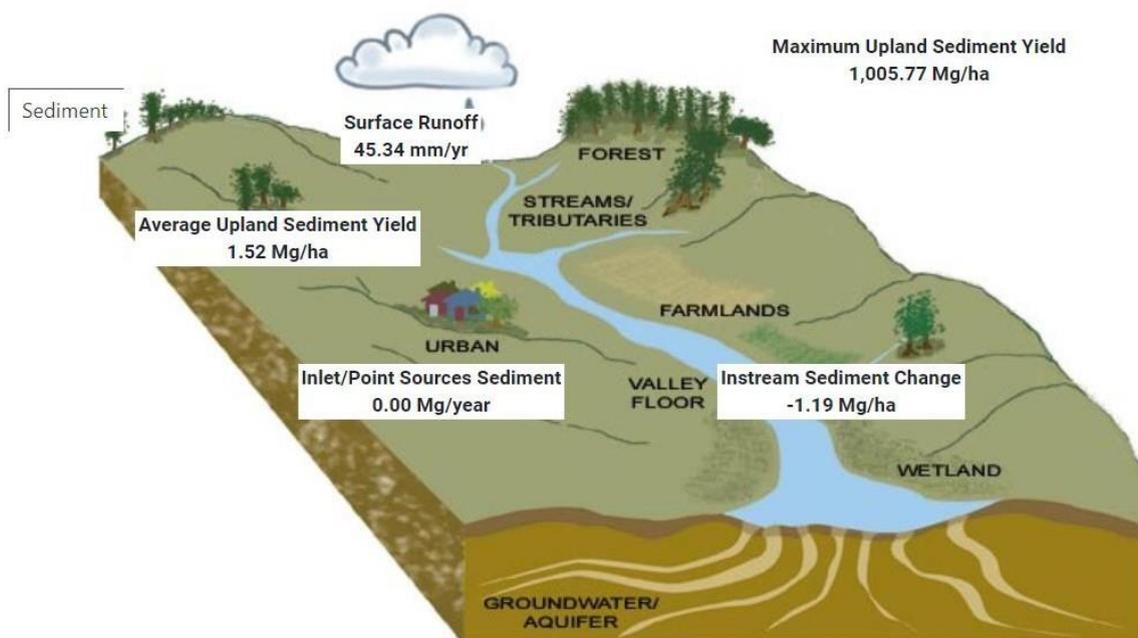
**Tabela 03.** Razões de equilíbrio hídrico

Razões de equilíbrio hídrico	
Fluxo/Precipitação	0,18
Fluxo de base/Fluxo total	0,71
Escoamento Superficial/Fluxo Total	0,29
Percolação/Precipitação	0,17
Recarga Profunda/Precipitação	0,01
ET/Precipitação	0,68

Fonte: SWAT Editor, 2023

O SWAT também entrega como resultado uma imagem com a relação dos sedimentos (figura 12) e o uso e distribuição da terra em forma de gráfico com a proporção dos maiores e menores usos da terra (figura 13).

**Figura 12.** Imagem com as proporções de sedimentos para esta bacia



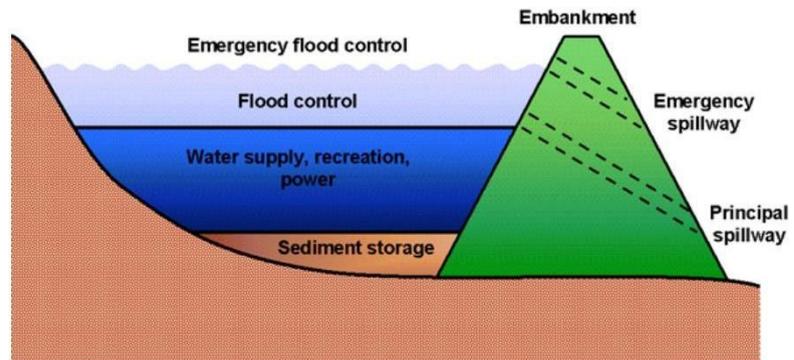
Fonte: SWAT Editor, 2023.

Com a análise do gráfico na Figura 14 verificou-se a existência de 11 classes de uso e ocupação, sendo elas: agricultura/pecuária (71,11%), uso predominante na bacia; área urbana (0,15%); brejo (0,19%); Caatinga (10,17%); campo limpo (1,39%); campo rupestre (2,66%); cerrado (2,70%); curso d'água (0,15%); floresta estacional (10,87%); floresta secundária (0,04%); lago/açude/ represa (0,56%); Apesar do SWAT possuir um extenso banco de dados com diversos tipos de uso e cobertura do solo,

vegetações tipicamente brasileiras como caatinga e cerrado não estão incluídas no modelo, sendo necessário cadastrá-las inserindo um grande número de parâmetros.

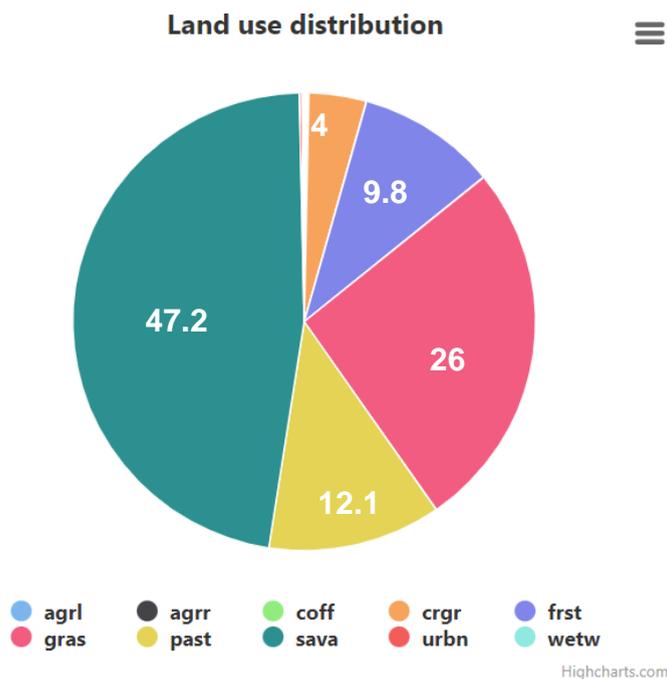
**Figura 13.** Relatório sobre os sedimentos

Average Trapping Efficiency (%)	
Sedime... <sup>Reservoirs</sup>	99.89
Nitrogen	72.00
Phosphorus	36.47
Average Water Loss (%)	
Total Removed + Losses	9.88
Evaporation	4.72
Seepage	0.00
Average Reservoir Trends	
Number of Reservoirs	8.00
Final/Initial Volume (Max)	7,529.63
Final/Initial Volume (Min)	1.40
Fraction of Period Empty (Max)	0.00



Fonte: SWAT Editor, 2023.

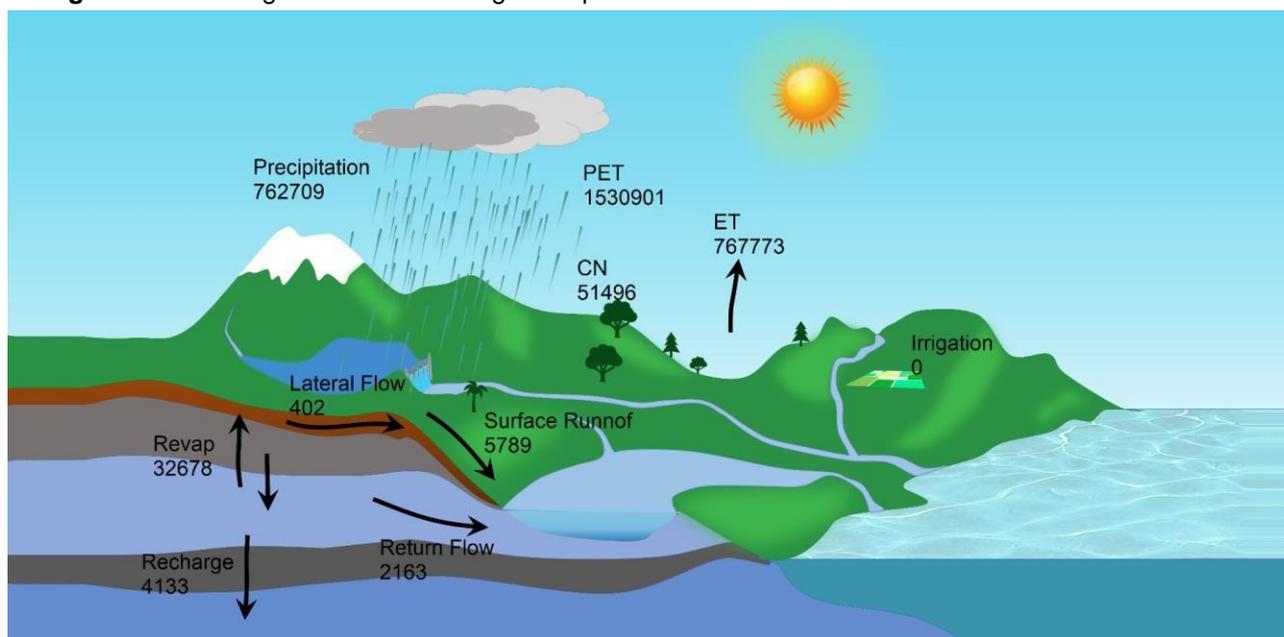
**Figura 14.** Uso e distribuição da terra de acordo com o SWAT



Fonte: Interface do SWAT Editor, 2024.

Na Figura 14 o SWAT entrega as proporções do ciclo hidrológico através de uma média geral na casa do milhar. Vale ressaltar que o valor de irrigação está zero pois não foi possível conseguir dados de irrigação da bacia para este trabalho.

**Figura 15.** Hidrologia média da bacia gerado pelo SWAT



Fonte: SWAT Editor, 2023.

**Tabela 04.** Dados gerados pela simulação no SWAT

<b>Model Version</b>	SWAT+ rev. 60.5.7	<b>Watershed Area</b>	234,392.52 ha
<b>Simulation Length</b>	40 years	<b>HRUs</b>	2,377
<b>Warm-up</b>	2 years	<b>LSUs</b>	265
<b>Weather</b>	Observed	<b>Subbasins</b>	14

Fonte: SWAT Editor, 2023.

LULC	AREA ha	CN	AWC mm	USLE_LS	IRR mm	PREC mm	SURQ mm	ET mm	SED th	NO3 kgh	ORGN kgh	BIOM th	YLD th
gras	61,422.54	63.38	NA	NA	0.00	852.90	89.89	741.98	1.12	0.06	1.13	0.00	0.00
sava	110,727.13	53.50	NA	NA	0.00	872.44	36.83	802.47	0.70	0.02	0.59	0.00	0.00
frst	22,971.08	36.09	NA	NA	0.00	836.31	169.42	461.98	0.81	0.00	1.08	72.85	0.00
wetw	305.91	0.00	NA	NA	0.00	877.23	293.53	740.41	0.00	0.71	0.00	61.58	0.00
NA	453.11	98.60	NA	NA	0.00	802.53	594.12	208.36	14.56	0.61	6.99	0.00	0.00
crgr	9,436.99	50.68	NA	NA	0.00	836.92	14.15	804.45	0.08	0.00	0.10	0.79	0.98
agrl	261.49	48.37	NA	NA	0.00	863.90	7.28	842.48	0.04	0.00	0.05	0.67	0.58
past	28,396.26	33.55	NA	NA	0.00	815.55	10.55	784.25	0.01	0.00	0.01	50.07	0.00
coff	294.06	26.91	NA	NA	0.00	784.93	28.39	635.96	0.08	0.00	0.16	34.42	0.00
agrr	178.79	47.92	NA	NA	0.00	886.35	6.99	861.80	0.01	0.00	0.03	0.68	0.73

De um modo geral, a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu apresentou perdas nas áreas de floresta. Com a maior perda de área florestal registrada na bacia de Utinga, na região do Alto Paraguaçu, apresentando uma perda de 33,85 hectares (ha) entre os anos de 1985 a 2021, o que corresponde a cerca de 12% de supressão

florestal. Observou-se também (Quadro 12) uma diminuição nas áreas de formação florestal não natural em quase todas as sub-bacias de contribuição com destaque para a bacia Andaraí com cerca de 5,5 % de redução entre os anos de 1985 e 2021.

De acordo com Sarmiento-Soares, Santos e Martins-Pinheiro (2020), na região do Alto Paraguaçu, se concentram as sub-bacias com altitudes de 1.000 metros (m) ou acima, há um grande número de barragens para captação de água, o que caracteriza a aptidão dessa área para o uso agrícola. Segundo os mesmos autores, entre as décadas de 1980 e 1990, houve uma grande supressão da área de Campos Gerais, vegetação característica da região, para a implantação de atividade agrícola mecanizada, marcada principalmente pelo uso de pivôs centrais; a agricultura, desde então, passou a ser uma das bases da economia local.

**Quadro 12.** Uso e cobertura da terra na bacia de contribuição Andaraí 1985 à 2021

Classe	1985		2021		1985- 2021
	Área (ha)	Porcentagem (%)	Área (ha)	Porcentagem (%)	Varição (%)
Floresta	133.818	57,17	110.085	47,04	-10,13
Formação natural não florestal	61.384	26,20	48.605,5	20,80	-5,50
Pastagem	37.288	15,90	21.425,5	9,20	-6,80
Área urbanizada	8	0,00	328	0,10	0,10
Área não vegetada	445	0,19	318	0,10	-0,10
Agricultura	713	0,30	52.223	22,30	22,00
Corpo d' água	417	0,18	1040	0,40	0,30

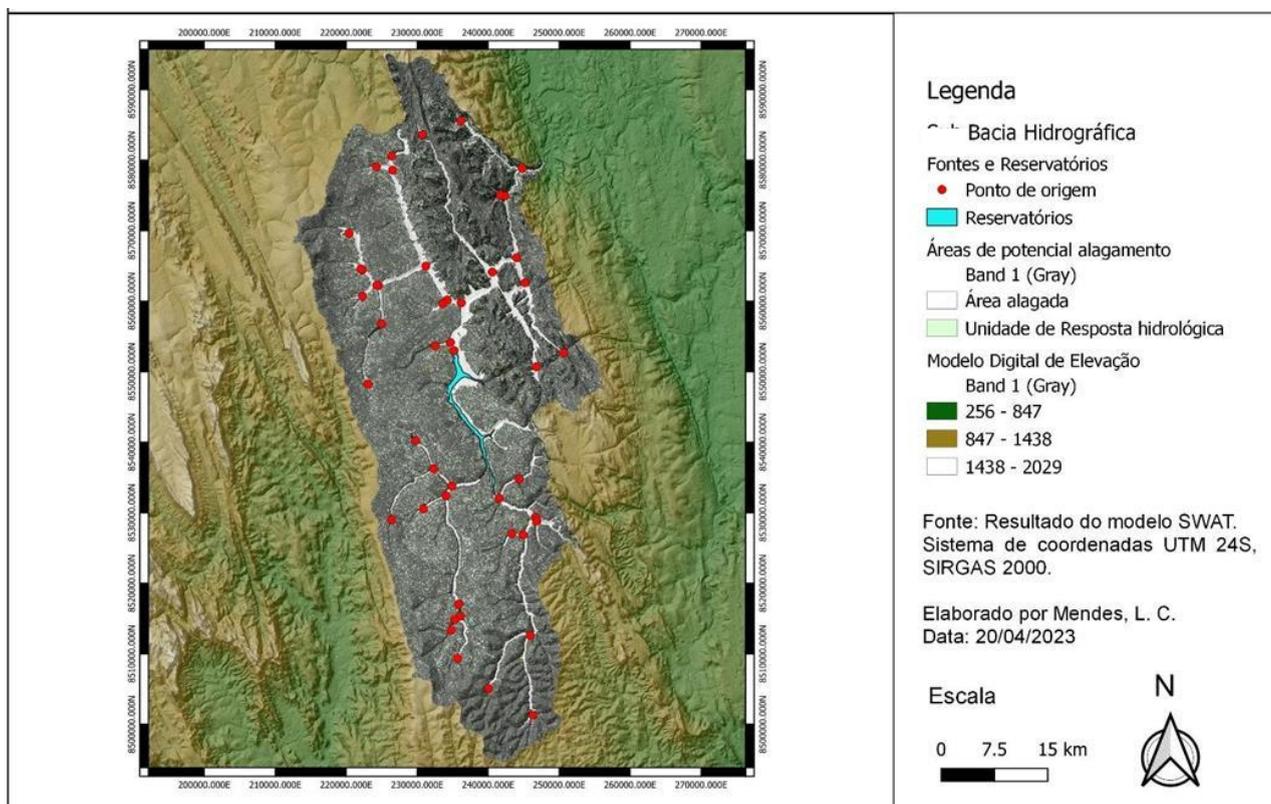
Fonte: Própria autora, 2023.

De acordo com Sarmiento-Soares, Santos e Martins-Pinheiro (2020), na região do Alto Paraguaçu, se concentram as sub-bacias com altitudes de 1.000 metros (m) ou acima, há um grande número de barragens para captação de água, o que caracteriza a aptidão dessa área para o uso agrícola. Segundo os mesmos autores, entre as décadas de 1980 e 1990, houve uma grande supressão da área de Campos Gerais, vegetação característica da região, para a implantação de atividade agrícola mecanizada, marcada principalmente pelo uso de pivôs centrais; a agricultura, desde então, passou a ser uma das bases da economia local.

Considerando que a irrigação é uma prática que consome grandes volumes de água, a oferta de água pelos mananciais deve ser preservada e ampliada, sendo a cobertura do solo um fator decisivo no escoamento superficial e no transporte de sedimentos, podendo influenciar indiretamente a qualidade e disponibilidade de água dos mananciais (VANZELA, 2010).

A figura 14 evidencia o reservatório principal da Barragem do Apertado em azul claro. Os pontos em vermelho são os pontos de origem das fontes de águas (sinalizando nascentes), que foram gerados pelo QSWAT através do cruzamento de informações das camadas do modelo digital de elevação e dados meteorológicos. Já em branco são as áreas com potencial alagamento, ou seja, não é garantido que em todo o tempo exista água, porém, o normal é ter água nessas áreas quando chove.

**Figura 16.** Distribuição das nascentes e áreas de potencial alagamento da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA



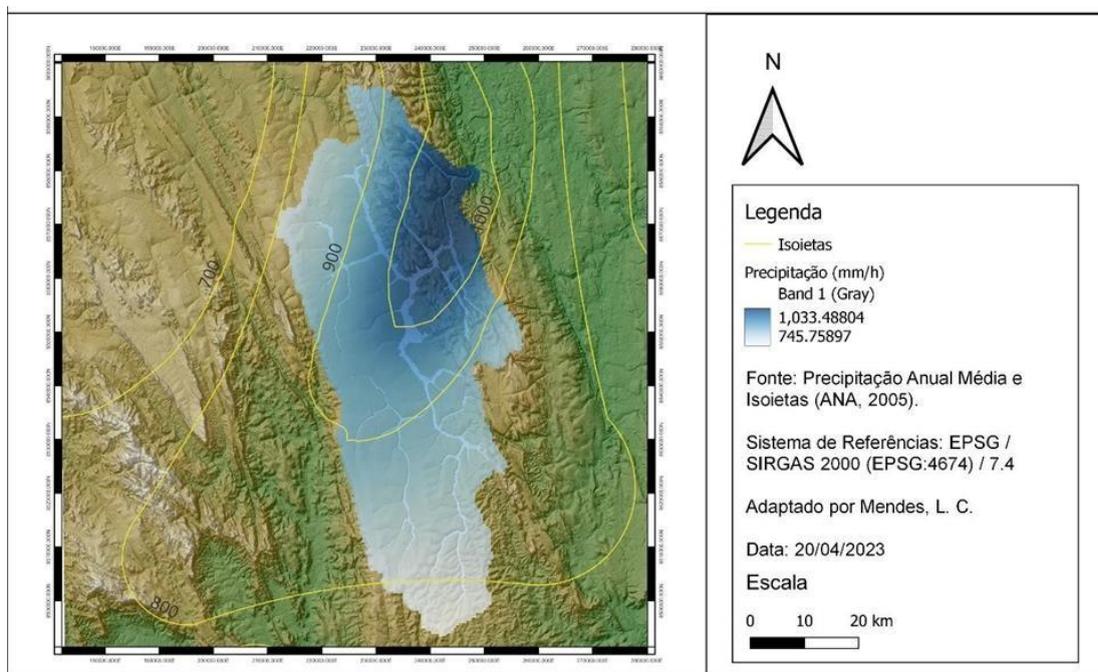
Fonte: Interface do QGIS e SWAT, 2023.

É possível observar através de imagens de satélites que nos limites da faixa marginal há ocorrência de áreas com a presença de solo exposto. As APPs, portanto, desempenham um papel essencial na conservação dos recursos naturais, principalmente as nascentes, que são indispensáveis à sobrevivência e ao bem-estar

humano, e faz com que essas áreas protegidas careçam de cuidado especial na sua manutenção.

A figura 17 mostra que a área que mais ocorre precipitação, indicada com a cor azul-escuro, na região é no trecho baixo do Paraguaçu e não no alto, logo, o trecho alto do Paraguaçu precisa ainda mais de áreas com vegetação nativa para realizar a cobertura do solo impedindo processo erosivos.

**Figura 17.** Precipitação média anual (mm) da Bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, BA



Fonte: Adaptado pela própria autora na Interface do QGIS, 2023.

## 6.1 Análise de vazão

A partir dos dados de vazão da ANA, foram calculadas as vazões máxima, mínima e média para a bacia de contribuição, entre os anos de 1985 e 2021.

**Quadro 13.** Posto fluviométrico utilizado para calibração e validação

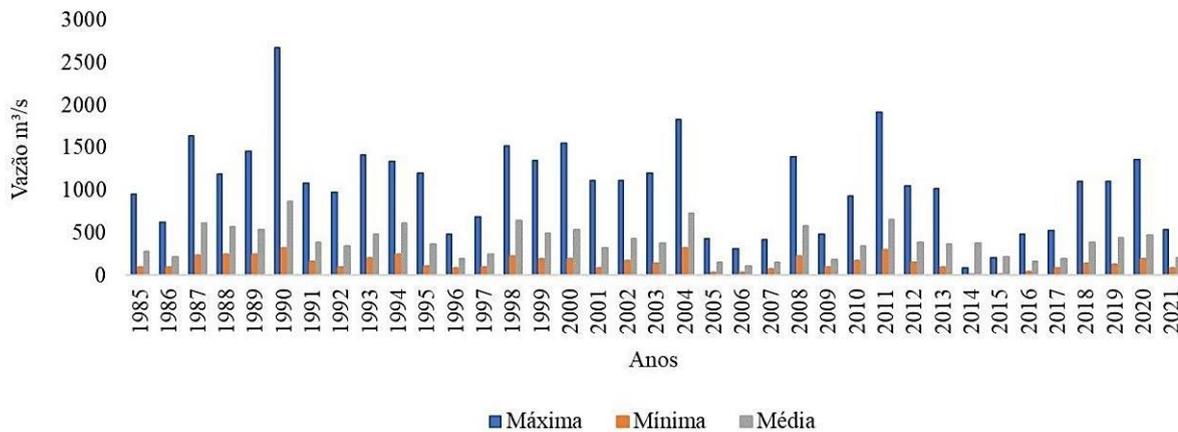
Código da Estação	Nome da estação	Rio	Responsável/ Operadora	Período coletado
51120000	ANDARAÍ	Paraguaçu	ANA/CPRM	1985-2021

Fonte: ANA, 2018.

A Figura 18 ilustra os valores de vazão registrados para a bacia 51120000 (Andaraí) entre os anos de 1985 e 2021. Para o ano de 1985, a vazão máxima, mínima e média na referida bacia de contribuição foi, respectivamente, 954 m<sup>3</sup>/s; 102 m<sup>3</sup>/s e

280 m<sup>3</sup> /s. Em 2021, houve uma queda nesses valores em relação aos primeiros registros da série histórica, apresentando vazão máxima, mínima e média de 531 m<sup>3</sup> /s; 89 m<sup>3</sup> /s e 205 m<sup>3</sup> /s, nessa ordem. Em 2021, os valores de vazão máxima e média caíram 45% e 26,79%, nessa ordem, e a mínima reduziu cerca de 12,75%.

**Figura 18.** Gráfico representativo de vazão na bacia de contribuição 51120000.



Fonte: Adaptado da ANA (2021)

De acordo com a figura 18 os dados de vazão obtidos, pôde-se observar que nos primeiros 20 anos (1985 a 2005) a média das vazões médias para a bacia de Andaraí foi de 1.229,38 m<sup>3</sup> /s. Nos últimos 10 anos, a média dos valores médios de vazão foi de 852,72 m<sup>3</sup> /s, o que significa uma queda de 31%, vale constatar ainda que nesta bacia houve o aumento da área de pastagem e na área urbana.

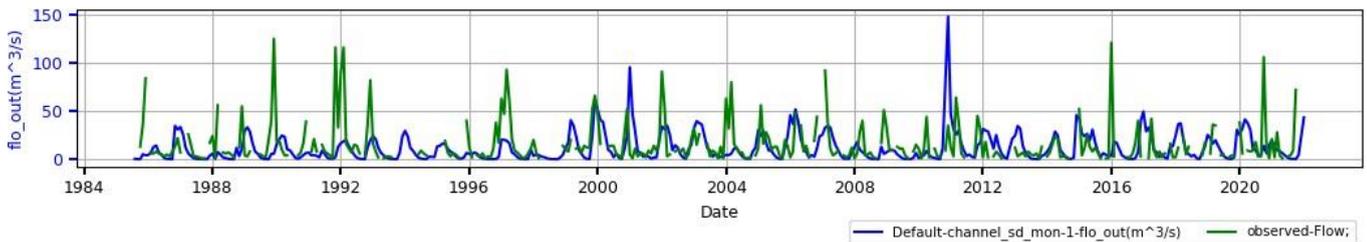
Tendo em vista os dados de vazão disponibilizados pela ANA, e os cálculos realizados para a determinação das vazões máxima, média e mínima, entre os anos de 1985 e 2021, verificou-se que houve uma redução significativa. Para a bacia de contribuição 51120000 foi observada, uma redução dos valores de vazão, uma vez que a máxima, mínima e média foram, respectivamente, 44,66%, 12,77% e 26,79% menores que os primeiros registros da série histórica, em 1985.

Apesar da barragem do apertado na bacia do Paraguaçu possuir uma capacidade de 108 hm<sup>3</sup>, um espelho d'água com cerca de 23 km de extensão e uma área hidráulica de 13,56 km<sup>2</sup> e uma vazão regularizada de 7,6 m<sup>3</sup>/s (CERB, 2022; PEREIRA, 2008). No tocante às questões voltadas aos conflitos relacionados ao uso da água, a bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, principalmente no trecho alto, é a que mais carece de ações de gerenciamento dos recursos hídricos, tendo em vista a grande demanda de captação de água para atender a avançada agricultura irrigada

presente da região (SOUZA, 2017).

No gráfico 01 são apresentados os resultados do comparativo entre vazão observada (linha verde) e simulada pelo SWAT (azul), no período de 1984 a 2021. Os resultados da análise de eficiência do modelo indicaram um COE de 0,68 e um EM =  $-0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Gráfico 01.** Hidrograma da vazão simulada versus vazão observada



Fonte: Interface do QGIS e SWAT, 2024.

Outro aspecto importante ressaltado por Brighenti et al. (2016) é que a má distribuição e a falta de dados dos postos pluviométricos para representar a realidade da bacia pode resultar em dados insuficientes para modelar o balanço hídrico em bacias hidrográficas. E esta foi uma limitação neste trabalho, onde os dados de 03 estações foram estimados pelo gerador climático do SWAT. Logo, este fato pode justificar, juntamente com os demais fatores, as diferenças nos picos de cheia e seca na vazão modelada.

As áreas ocupadas por matas favorecem o aumento da vazão específica em virtude da maior cobertura, estabilidade e infiltração de água no solo, além de promover redução da intensidade do escoamento superficial contribuindo também para a melhoria da qualidade da água. De maneira geral, as áreas habitadas, agricultadas e as matas degradadas, contribuem para a redução da vazão específica e da qualidade de água em função da alteração na intensidade do escoamento superficial.

A expansão da agricultura irrigada, o aumento nas áreas de pastagem e a diminuição das florestas podem estar diretamente relacionadas a depleção dos recursos hídricos na região. Em um estudo realizado por Calijuri et al. (2015) na bacia do Alto Paraguaçu, permitiu detectar que as mudanças no uso/cobertura da terra influenciaram na variação da precipitação e também na disponibilidade de água.

Outro fator que pode estar relacionado ao decréscimo nos valores de vazão é

a presença de poços para captação e uso dos mananciais hídricos subterrâneos na bacia do rio Paraguaçu. De acordo com dados da CERB, foram cadastrados na bacia um total de 2.165 poços (destes 68 no município de Andaraí) que estão distribuídos de uma forma muito heterogênea, em função das demandas locais e da disponibilidade (INEMA, 2018).

Outro fator relevante é o manejo do solo agrícola e o tipo de cultura implantada, pois se as condições de infiltração são afetadas, tem-se um aumento do escoamento superficial com riscos de erosão e perda de solo, e uma redução da alimentação do aquífero que reflete nas vazões (TUCCI, 2002).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado na bacia hidrográfica do Paraguaçu, constatou que o uso e ocupação da terra, desde o ano de 1985, início dos registros pelo MapBiomass, tem gerado alterações significativas em suas vazões. O aumento da área urbanizada, redução da área de floresta e a expansão das práticas de irrigação constatados na bacia do alto do Paraguaçu impactam diretamente na disponibilidade hídrica da região, fato que pode ser atestado com os dados das estações fluviométricas, visto que os mesmos apresentam tendência de diminuição das vazões, principalmente as vazões mínimas.

A construção do reservatório do Apertado e a abertura de muitos poços tubulares profundos, com ao menos 2.165 cadastrados podem justificar também o aumento da demanda por irrigação agrícola e a redução nos valores de vazão mínima. Isso pode ser um indicativo de déficit hídrico nessa bacia, considerando que esse é o nível de vazão que assegura a qualidade e quantidade de água necessária para manter minimamente os componentes, funções e processos dos ecossistemas aquáticos. Isso evidencia a necessidade de intervenções que garantam o adequado manejo dessas bacias com intuito de evitar uma crise hídrica na região.

Pode-se inferir que houve diferenças significativas entre alguns componentes do balanço hídrico ao longo do tempo, mesmo sendo a mesma área, mesmo tipo de solo e mesma declividade, o uso do solo pode ser considerado o fator de maior influência neste balanço.

As alterações do uso e ocupação do solo na bacia do alto do Paraguaçu ao longo dos 36 anos vêm ocasionando impactos negativos no ambiente local como os decorrentes do assoreamento dos corpos hídricos.

Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram relacionados às propriedades físicas do solo e ao manejo, como o número da curva, capacidade de água disponível e a condutividade hidráulica.

O SWAT se mostrou com potencial, porém, houve inconsistências nos dados de entrada de vazão, que impossibilitou de realizar previsões futuras. Logo, o SWAT requer mais calibrações. A sugestão para os próximos trabalhos é que se realize uma regionalização de vazão, que se trata de uma técnica que permite transferir informação entre bacias hidrográficas semelhantes, a fim de calcular, em sítios que não dispõem de dados, as variáveis fluviométricas de interesse.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: informe anual**. Brasília: ANA, 2017. 177p.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. 2021. **Conjuntura Recursos Hídricos do Brasil**. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/usos-da-agua>. Acesso em: 20 out. 2023.

AGHSAEI, H., et. Al. **Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran**. Science of The Total Environment, V. 712, 2020, 136449, ISSN 0048-9697, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136449>>.

AKOKO, G.; LE, TH; GOMI, T.; KATO, T. **A Review of SWAT Model Application in Africa**. Water 2021, 13, 1313. <https://doi.org/10.3390/w13091313>.

AMORIM, J. de S., **Produção de água na Bacia Hidrográfica do Rio Catolé Grande utilizando o modelo hidrológico SWAT**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 82 fl. Itapetinga-BA, 2016.

ALVARES, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/00000022/00000006/art00008?token=004f1a11bab2a729bc7e41225f40382d2c2b4652767446624550576b34272c5f7b3d6d3f4e4b34a>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S.. **Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 1, p.69-76, out. 2013.

ANDRADE, P. R. G. S. **A complexa conexão entre sustentabilidade, conflitos e gestão de recursos hídricos: evidências de um estudo de caso**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza, CE. Anais. Porto Alegre: ABRH, 2010.

CD-ROM.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. **Modelagem do escoamento na sub-bacia do rio Japaratuba-Mirim (SE) através do modelo SWAT**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, PB. Anais. Porto Alegre: ABRH, 2012. CD-ROM.

ARNOLD, J. G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R. S., & WILLIAMS, J. R. (1998). **Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development**. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73e89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961>.

ARROIO, J. P. O. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool – SWAT**. 2016. 180 f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2016.

BERIHUN, ML, TSUNEKAWA, A., HAREGEWEYN, N., MESHESHA, DT, ADGO, E., TSUBO, M., MASUNAGA, T., FENTA, AA, SULTAN, D., YIBELTAL, M. E EBABU, K.: **Hydrological responses to land use/land cover change and climate variability in contrasting agroecological environments of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia**, *Sci. Total Environ.*, 689, 347–365, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.338> , 2019.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2006.

BERTONI J. C.; TUCCI, E. M. C. “Precipitação”. In: TUCCI, E.M.C.; **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS: ABRH, 2001. n.177, p. 180-182.

BIGARELLA, J.J. & SUGUIO, K. (1990) Ambientes Fluviais. Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná, Florianópolis, 2.ed., apud FRITZEN, Maycon; BINDA, Andrey Luis. **ALTERAÇÕES NO CICLO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS: cidade, hidrologia e impactos no ambiente**. Ateliê Geográfico, Goiânia-GO, v.5, n.3 dez/2011, p239 -254, p.239.

BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; MONTEIRO, J. A. F.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. **Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in brazilian watersheds and river basins.** Tópicos Ci. Solo, v. 9, p. 241-290, 2015.

BOSCH, JM E HEWLETT, JD: **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water production and evapotranspiration,** J. Hydrol., 55, 3– 23, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2) , 1982.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. **Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p53-64>

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. **Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ.** Rev. Árvore, Vol. 30, N. 2, pp. 241-248, 2006.

CARELLI, L.; SANTO, S. M. **Semeando águas no Paraguaçu** / organizadores: Ivana R. Lamas, S471 Luciana Santa Rita, Rogério Mucugê Miranda. – Rio de Janeiro: Conservação Internacional, Brasil, 2016.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias.** 2001. 270 p. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Porto Alegre, 2001.

COSTA, MH, BOTTA, A., E CARDILLE, JA: **Efeitos de mudanças em grande escala na cobertura da terra na descarga do rio Tocantins, sudeste da Amazônia,** J. Hydrol., 283, 206–217, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1) , 2003.

DIAS, D. E. **Análise da ferramenta de avaliação de água e solo – SWAT+: exemplo da sub-bacia do lago Tana na Etiópia.** 2022. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal do Pampa, Itaqui, 2019.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. **Aplicabilidade do Modelo SWAT Para Simulação Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, MG.** Cerne, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

EASTON, Z. M., FUKA, D. R., WHITE, E. D., COLLICK, A. S., BIRUK ASHAGRE, B., MCCARTNEY, M., & STEENHUIS, T. S. (2010). **A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedi- mentation in the Blue Nile Ethiopia.** Hydrology and Earth System Sciences, 14(10), 1827–1841.

EMBRAPA, **Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra.** Anais do IV Seminário da Rede Agrohidro. 1 CD-ROM (281 p.): il. color.; 4 ¾ pol. ISBN 978-85-7035-632-1. Brasília, DF. 2016.

FARIAS, et Al., **APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DE VAZÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA DO BIOMA CERRADO: o caso da bacia do Rio das Almas, Goiás.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 8 p. Vitória, ES, 2018.

FERNANDEZ, J. C.; **A Otimização dos Recursos Hídricos e a Geração de Energia Elétrica: O Caso da Bacia do Alto Paraguaçu na Bahia.** Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 32, n. Especial p. 483-504, novembro 2001.

FERRIGO, S. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal.** Trabalho de Conclusão do Curso, Instituto de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2011. 90 p.

FOLEY, JA, DEFRIES, R., ASNER, GP, BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, SR, CHAPIN, FS, COE, MT, DAILY, GC, GIBBS, HK, HELKOWSKI, JH, HOLLOWAY, T ., HOWARD, EA, KUCHARIK, CJ, MONFREDA, C., PATZ, JA, PRENTICE, IC, RAMANKUTTY, N., AND SNYDER, PK: **Global consequences of land use**, Ciência, 309, 570–574, <https://doi.org/10.1126/science.1111772> , 2005.

FONTES, A. S.; OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. 2010. **Calibração do modelo**

**SWAT em bacia do semiárido com auxílio da hidrologia isotópica.** In: Anais. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Fortaleza, CE. 2010.

FUKUNAGA, D. C., **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo.** Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. JERÔNIMO MONTEIRO – ES, 2012. 98f.

GARG, V., AGGARWAL, SP, GUPTA, PK, NIKAM, BR, THAKUR, PK, SRIVASTAV, SK, E SENTHIL KUMAR, A.: **Assessing the impact of land cover change on the hydrological regime of a watershed, Environ. Earth Sci.**, 76, 1–17, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6976-z>, 2017.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. **Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights.** J. Environ. Qual., v. 43, n. 1, p. 1-8, 2014. doi:10.2134/jeq2013.11.0466.

GENZ, F. **Avaliação dos efeitos da Barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do rio Paraguaçu e Baía de Iguape.** Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia. 2006.

GENZ, F.; SILVA, S. F.; TANAJURA, C. A. S. **Impacto das mudanças climáticas nas vazões do rio Paraguaçu - cenário A1B de 2011 a 2040.** In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, PB. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2012. CD-ROM.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B.; **Geomorfologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pp. 337-339, 1996.

GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S., BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação do solo: Conceitos, temas e aplicação.** 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009, 340p.

HAMMAN, JJ, NIJSSEN, B., BOHN, TJ, GERGEL, DR E MAO, Y.: **The Variable Infiltration Model Version 5 (VIC-5): Infrastructure improvements for new applications and reproducibility, Geosci. Model Dev.**, 11, 3481–3496, <https://doi.org/10.5194/gmd-11->

3481-2018, 2018.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. **Agricultural benefits for Senegal River Basin.** J. Irrig. Drain. Eng., v. 111, n. 2, p. 113-124, June 1985.

HIMANSHU, S. K., PANDEY, A., YADAV, B., & GUPTA, A. (2019). **Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model.** Soil and Tillage Research, 192, 42–58.

INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Mapa temático: regiões de planejamento e gestão das águas.** 2013. Disponível em: < inema.ba.gov.br/wp-content/files/MTematico\_rpga.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2013.

INPE, **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica.** Camilo Daleles Rennó, I Escola de Primavera, Santa Maria, setembro, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Banco de dados 2004/ 2010/ 2017/ 2019/ 2021. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> . Acesso em: 05 nov. 2023.

KARMANN, Ivo. **Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. Decifrando a terra.** Tradução. São Paulo: Oficina de textos, 2000. p. 113-138. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/eaf15922-73fc-47f7-b1ad-95b89d1063c1/1131146.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2023.

LANNA, A. E. L. MODHAC - **Modelo Hidrológico Auto Calibrável.** (Versão DOS 1997). IPH – UFRGS. Porto Alegre. 55p.

Li, S., Li, J., HAO, G., & Li, Y. (2021). **Evaluation of best management practices for non-point source pollution based on the SWAT model in the Hanjiang River Basin China.** Water Supply, 21(8), 4563–4580.

MAO.D, CHERKAUER, K.A. **Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region,** Journal of Hydrology, Volume 374, Issues 1–2, 2009, Pages 71-

MAPBIOMAS. **Coleção 7 da série anual de mapas de uso e cobertura da terra do Brasil**. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 26 de julho de 2023.

MARINHO FILHO, G. M., ANDRADE, R. S., JUNIOR, J. C. Z., MAGALHÃES FILHO, L. N. **L. MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES**. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47, 2012 / ISSN 1981-8858.

MARTINS, L.L; W. A.; DE MORAES, J. F. L., JÚNIOR, M. J. P.& DE MARIA, I. C. 2020.**Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar**. Revista Brasileira de Geografia Física,13(02), 576-594. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p576-594>

MELLO NETO, M. J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2013.

MOREIRA, I. A. 2005. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 81p.

MORIASI, D. N; WILSON, B. N; DOUGLAS, M. K. R; ARNOLD J.G.& GOWDA P.H. 2015.**Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria**. Transactions of the ASABE, 58(6),1763-1785.

NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005**. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 2005, 530p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation: Version 2009**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011. (Technical Report, no. 406).

NETO, A. A. M.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. **Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico complexo de clima semi-árido.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió, AL. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2011. CD-ROM.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2014.

PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. **Large Scale Hydrological Simulations Using the Soil Water Assessment Tool, Protocol Development, and Application in the Danube Basin.** J. Environ. Qual., v. 43, n. 1, p. 145-154, Jan. 2014.

PINTO, N. M.; BARBOSA JÚNIOR, A. R. **A importância de uma boa gestão dos recursos hídricos para a cidade do Rio de Janeiro.** RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 4, p. 86-95, 2010.

QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. **Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, n.1, p. 44-54, jan./mar. 2008.

ROGGER, M., AGNOLETTI, M., ALAOUI, A., BATHURST, JC, BODNER, G., BORGA, M., CHAPLOT, V., GALLART, F., GLATZEL, G., HALL, J., HOLDEN, J., HOLKO, L., 44 HORN, R., KISS, A., QUINTON, JN, LEITINGER, G., LENNARTZ, B., PARAJKA, J., PETH, S., ROBINSON, M., SALINAS, JL, SANTORO, A., SZOLGAY, J., TRON, S., E VIGLIONE, A.: **Water Resour. Res.**, 53, 5209- 5219, <https://doi.org/10.1002/2017WR020723> , 2016.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos.** São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.  
SARMENTO-SOARES LM, SANTOS ACA, MARTINS-PINHEIRO RF, MARTINS SF, TAKAKO AK. **The paradox of irrigation efficiency: Brazilian Caatinga's fish fauna threatened by crop irrigation.** 2020. E-letters Science 2018; 361: 6404, 748-750.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em:

<[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012\\_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf)>.

SANTOS, A. C. DOS., MARTINS, C. DE M., NÁGELA, F; J. **Quantificação das cargas de nitrogênio e fósforo na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Bom Jardim MG.** 2020. 33, VL - 68. 10.36659/dae.2020.050. Revista DAE.

SARAVANAN S, SINGH L, SATHIYAMURTHI S, SIVAKUMAR V, VELUSAMY S, SHANMUGAMOORTHY M. **Predicting phosphorus and nitrate loads by using SWAT model in Vamanapuram River Basin, Kerala, India.** Environ Monit Assess. 2022 Dec 9;195(1):186. doi: 10.1007/s10661-022-10786-2. PMID: 36482108.

SILVA, M. T., SILVA, V. de P. R. da, SOUZA, E. P. de, & ARAÚJO, A. L. (2016). **Aplicação do Modelo SWAT na Estimativa da Vazão na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco (SWAT Model Application to Estimate the Flow in the Basin of Lower- Middle São Francisco River).** Revista Brasileira De Geografia Física, 8(6), 1615–1627. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150091>. Acesso em: 13 de nov. de 2023.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS - SRH. **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia.** CD1. Salvador, 2004.

SERRÃO, E.A.O.; SILVA, M.T.; FERREIRA, T.R.;ATAIDE, L.C.P.; ASSIS, C. SANTOS, C.A.; LIMA, A.M.M.; SILVA, V.P.R.; SOUSA, F.S.; CARDOSO, J.D.G. **Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model.** International Journal of Sediment Research. 2021.

SERRÃO, E.A.O.; SILVA, M.T.; FERREIRA, T.R.; SILVA, V.P.R.; SOUSA, F.S.; LIMA, A.M.M.; ATAIDE, L.C.P.; WANZELER, R.T.S. **Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon.** Science of the Total Environment. v. 744, 140981, 2020.

SHAO, M.A., JIA, X., WANG, Y., ZHU, Y., 2016. **A review of studies on dried soil layers in the loess plateau.** Adv. Atmos. Sci. 31 (1), 14–22.

SHARMA, **Evaluation of best management practices to reduce phosphorus and**

**sediment.** 2022. Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal.

SILVA, S.F. **Análise da disponibilidade e demanda para o sistema de abastecimento de água de Salvador frente a cenário de mudanças climáticas.** 2012. 148 p. Dissertação. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, G. O. M.; MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A.S.; MONTENEGRO, S. M.G.L. **Integração de outorgas na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Bahia).** Rev. Bra. De Recursos Hídricos, v. 22, e.38, 2017.

SILVA, F.E.; NAGHETTINI, M.; FERNANDES, W. **Avaliação bayesiana das incertezas nas estimativas dos parâmetros de um modelo chuva-vazão conceitual.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, out/dez, 2014.

SILVA, B.M.B.; SILVA, D.D.; MOREIRA, M.C. **Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba.** Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 3, p. 623-634, jul/set, 2015.

SILVEIRA A. L. da; LOUZADA J. A.; BELTRAME, L. F. **Infiltração e armazenamento de água no solo.** In: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre, RS: UFRGS/ABRH, 2007. p. 335-372. 943p.

SINGH, L., & SARAVANAN, S. (2020b). **Impact of climate change on hydrology components using CORDEX South Asia cli-mate model in Wunna, Bharathpuzha, and Mahanadi India.** Environmental Monitoring and Assessment, 192(11), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08637-z>.

SOUZA, C.N. **Avaliação dos usos da água na barragem do apertado, Mucugê- BA.** 2017.51p.Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2017.

SOUZA, V. A. S. **Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO.** Dissertação de mestrado,

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc\\_download/2598-viniciusalexandre-sikora-de-souza?Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc_download/2598-viniciusalexandre-sikora-de-souza?Itemid=)>. Acesso em: 3 mar. 2023.

SOUZA, W. V., **Aplicações Do Modelo Swat No Brasil: Revisão E Estudo De Caso – Amazônia**. Curso de Engenharia Ambiental E Sanitária. Universidade Federal De Juiz De Fora. Trabalho Final de Curso. 2016.

TAN, M. L., GASSMAN, P. W., LIANG, J., & HAYWOOD, J. M. (2021). **A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions**. *Science of The Total Environment*, 148915.

TEODORO, V. L. I.; Teixeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. *Revista Uniara*, v.20, p.137-157, 2007.

THORNTON, P.K., ERICKSEN, P.J., HERRERO, M., CHALLINOR, A.J., 2014. **Climate variability and vulnerability to climate change, a review**. *Global Change Biol.* 20 (11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>.

TRENTIN, R., LAURENT, F., ROBAINA, L. E. de S., **O impacto do uso da terra sobre o balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio santa maria – Oeste do Rio Grande do Sul – Brasil**. v. 17 n. 1 (2023): Edição Especial: Transição agrícola e ambiental do meio rural brasileiro. <https://doi.org/10.22456/1982-0003.129906>

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2009, 943 p.

VALÉRIO, E.L.S.; JÚNIOR, C.R.F. **Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA**. *Rev. Bra.de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 872-887, 2015.

VANZELA, Luiz. S., HERNANDEZ, Fernando B. T., FRANCO, Renato A. M. **Manejo de Solo, Água e Planta** • *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 14 (1) • Jan 2010. Acesso em:

<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100008>

WANG, Y.; WANG, S.; WANG, C.; ZHAO, W. **Runoff sensitivity increases with land use/cover change contributing to runoff decline across the middle reaches of the Yellow River basin**, Journal of Hydrology, Volume 600, 2021, 126536, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126536>.

ZHANG, T., ZHANG, X., XIA, D., E LIU, Y.: **Uma análise da dinâmica de mudança do uso da terra e seus impactos nos processos hidrológicos na Bacia do Rio Jialing**, Water, 6, 3758–3782, <https://doi.org/10.3390/w6123758>, 2014.