



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ALTAMIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

NAYRA VIANA MERCES

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)
NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAURUÇU, AMAZÔNIA PARAENSE**

Altamira/PA

2025

NAYRA VIANA MERCES

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)
NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAURUÇU, AMAZÔNIA PARAENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas (IFCH), da Universidade Federal do Pará (UFPA), para obtenção do Título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Dinâmicas Socioambientais e Recursos Naturais na Amazônia.

Orientador: Prof^o.Dr^o. Gabriel Alves Veloso

Altamira/PA

2025

NAYRA VIANA MERCES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO), Do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas (IFCH), da Universidade Federal do Pará (UFPA), para obtenção do Título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Dinâmicas Socioambientais e Recursos Naturais na Amazônia.

Orientador: Profº.Drº. Gabriel Alves Veloso

BANCA EXAMINADORA

Profº. Drº. Gabriel Alves Veloso (Orientador – PPGEO/UFPA)

Profº. Drº. Wellington de Pinho Alvarez (Examinador Interno – PPGEO/UFPA)

Profº.Drº. Cleberson Ribeiro de Jesus(Examinador Externo- UFMT)

Profª.Drª. Livânia Norberta de Oliveira (Suplente- PPGEO/UFPA)

Altamira/PA

2025

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo.
Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.”*

-Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

Agradeço pela possibilidade de concluir esse trabalho. Foram dois anos de difíceis e desafiadores, mas, diante do processo de resiliência, fui capaz de concluir essa tarefa.

Agradeço todo o apoio e profissionalismo da minha psicóloga, Dr^a Hildenora Oliveira, que me acompanha desde a minha graduação e permitiu eu enxergar que eu sou capaz de obter boas conquistas.

Agradeço ao amor e motivação recebido através dos meus sobrinhos, sou agradecida por ter cada um de vocês, que fazem com que eu possa continuar e aperfeiçoar-me cada vez mais. Meus amados; Helena Quitéria, a minha primogênita, Stella Maia, minha bela flor e, Bernardo Rodrigues, príncipe amado.

Agradeço aos meus irmãos, Adrielly Mercês e Junior Mercês, poder ver em vocês orgulho que estão a ter de mim é fundamental, gracioso. O nosso caminho até aqui foi muito árduo, mas fomos/somos capazes de sermos melhores cada vez mais e, estamos a conquistar tudo o que almejamos e merecemos.

Agradeço ao meu companheiro de vida, José Willian Rodrigues, que foi amigo, cuidadoso, atencioso e paciente diante de dias difíceis. O seu apoio foi fundamental durante esses anos.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Prof^o. Dr^o. Gabriel Alves Veloso, esse que me acolheu no início da minha graduação, aos 17 anos e, desde então, tem sido extremamente importante durante esses seis anos de orientação (graduação e mestrado). Obrigada por tudo!

Agradeço aos meus queridos amigos que conheci no laboratório e tornaram-se família, Prof^o. Me. Alexandre Augusto Lobato e ao Prof^o.Me. Nadson de Pablo Costa, estamos nessa caminhada desde as nossas graduações e, compartilhar os bons momentos e os difíceis com vocês torna tudo mais agradável. Gratidão!

Agradeço a todo o Laboratório de Geografia Física e Cartografia – LAGEO, é uma grande honra fazer parte de tudo isso e por tanto tempo nesse espaço e poder compartilhar conhecimentos e momentos de lazer ao lado de cada um dos integrantes.

Resumo

A sub-bacia do Rio Jauruçu, afluente do Rio Xingu, foi escolhida como área de estudo devido à sua relevância socioambiental e aos impactos significativos causados pela expansão das atividades agropecuárias, principalmente a partir da construção da BR-230 (Transamazônica), que facilitou o processo de ocupação na região. Esse processo de conversão de grandes áreas de floresta em pastagens, tem afetado diretamente o ciclo hidrológico e a qualidade dos recursos hídricos. Para a realização desse estudo, foi utilizado o modelo o SWAT, que é uma ferramenta de simulação hidrológica que permite avaliar os impactos do uso do solo e das práticas de manejo no ciclo hidrológico. A pesquisa abrange um período de 30 anos (1991-2021), com foco na dinâmica do uso do solo e os seus efeitos no balanço hídrico, produção de sedimentos e sustentabilidade ambiental, esse período permite a comparação dos impactos ao longo do tempo. Os resultados indicaram transformações significativas no balanço hídrico da sub-bacia, com aumento do escoamento superficial, redução da evapotranspiração e incremento na produção de sedimentos. A precipitação média anual apresentou uma tendência de aumento, com picos em anos específicos, possivelmente relacionados a mudanças climáticas e eventos extremos, algo que deve ser analisado com mais precisão. A evapotranspiração, embora tenha apresentado valores semelhantes entre 1991 e 2021, mostrou-se influenciada pela cobertura vegetal e pelas condições climáticas locais, contudo, esses resultados pode ser limitações do modelo, pode ser necessário o reajuste dos parâmetros das variáveis. O escoamento superficial aumentou significativamente, especialmente a partir de 2009, refletindo a redução da cobertura vegetal e o aumento da impermeabilidade do solo, estando relacionada diretamente às atividades agropecuárias. A produção de sedimentos também apresentou um aumento expressivo, com picos em anos de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas que ocorrem em um curto período, que aceleraram os processos erosivos. Em suma, esse estudo destacou a importância da vegetação nativa para o equilíbrio de e regularização do ciclo hidrológico da sub-bacia. Evidencia-se a necessidade de políticas públicas e a implementação de práticas de manejo sustentável, e a incorporação de estações pluviométricas e fluviométricas em pontos estratégicos da sub-bacia, para haver um estudo, mais detalhado dos elementos climáticos e fluviais da região e a influência que no balanço hídrico e em outros parâmetros, como análises sedimentológicas e de vazão na sub-bacia do rio Jauruçu-PA. Em conclusão, o trabalho demonstrou a eficácia do modelo SWAT na análise de bacias hidrográficas tropicais, mesmo em condições de dados limitados, e forneceu subsídios relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos na Amazônia. A pesquisa reforçou a importância de estratégias de conservação florestal e reflorestamento para mitigar os impactos das mudanças no uso do solo e das alterações climáticas.

Palavras-chave: Paisagem; Recursos Hídricos; Geotecnologias; SWAT.

Abstract

The sub-basin of the Jauruçu River, a tributary of the Xingu River, was chosen as the study area due to its socio-environmental relevance and the significant impacts caused by the expansion of agricultural activities, especially from the construction of the BR-230

(Trans-Amazonian Highway), which facilitated the process of occupation in the region. This process of converting large areas of forest into pastures has directly affected the hydrological cycle and the quality of water resources. To carry out this study, the SWAT model was used, which is a hydrological simulation tool that allows the evaluation of the impacts of land use and management practices on the hydrological cycle. The research covers a period of 30 years (1991-2021), focusing on the dynamics of land use and its effects on water balance, sediment production and environmental sustainability, this period allows the comparison of impacts over time. The results indicated significant transformations in the water balance of the sub-basin, with increased surface runoff, reduced evapotranspiration and increased sediment production. The average annual rainfall showed an upward trend, with peaks in specific years, possibly related to climate change and extreme events, something that should be analyzed more precisely. Evapotranspiration, although it presented similar values between 1992 and 2021, was influenced by vegetation cover and local climatic conditions, however, these results may be limitations of the model, it may be necessary to readjust the parameters of the variables. Surface runoff increased significantly, especially from 2009 onwards, reflecting the reduction of vegetation cover and the increase in soil impermeability, being directly related to agricultural activities. Sediment production also showed a significant increase, with peaks in years of extreme weather events, such as intense rainfall that occurs in a short period, which accelerated erosive processes. In summary, this study highlighted the importance of native vegetation for the balance of and regularization of the hydrological cycle of the sub-basin. It is evident the need for public policies and the implementation of sustainable management practices, and the incorporation of rainfall and fluciometric stations at strategic points of the sub-basin, in order to have a more detailed study of the climatic and fluvial elements of the region and the influence that on the water balance and other parameters, such as sedimentological and flow analyses in the sub-basin of the Jsuruçu River-PA. In conclusion, the work demonstrated the effectiveness of the SWAT model in the analysis of tropical watersheds, even under limited data conditions, and provided relevant subsidies for the sustainable management of water resources in the Amazon. The research reinforced the importance of forest conservation and reforestation strategies to mitigate the impacts of changes in land use and climate change.

Keywords: Landscape; Water Resources; Geotechnologies; SWAT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais componentes da Sub-bacia do Jauruçu.....	10
Figura 2: Esquema do ciclo hidrológico.....	13
Figura 3: Mapa de localização da Sub-Bacia do Rio Jauruçu.....	21
Figura 4: Precipitação média mensal da Região.	24
Figura 5: Mapa das Unidades Geológicas da Sub-Bacia do Rio Jauruçu.....	26
Figura 6: Mapa das Unidades Geomorfológicas da Sub-Bcia do Rio Jauruçu.....	29
Figura 7: Mapa dos Tipos de Solos da Sub-Bacia do Rio Jauruçu.	31
Figura 8: Mapa dos tipos de vegetação presentes na sub-bacia do Rio Jauruçu.	33
Figura 9: Mapas de Uso e Ocupação da sub-bacia do Rio Jauruçu-PA para os anos 1991, 2001, 2011 e 2021.	35
Figura 10: Formação de vorçoroca e drenagem assoreada.	37
Figura 11: Organograma das fases de processamento do modelo SWAT.	39
Figura 12: Mapa de localização das estações da ANA.....	45
Figura 13: Ciclo Hidrológico simulado pelo modelo SWAT+.....	48
Figura 14: Precipitação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021	56
Figura 15: Precipitação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu nos últimos 30 anos.	58
Figura 16: Evapotranspiração média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021. .	59
Figura 17: Evapotranspiração Potencial média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.	61
Figura 18: Escoamento Lateral média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021. .	63
Figura 19: Escoamento Superficial média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.	64
Figura 20: Percolação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.	65
Figura 21: Produção de Sedimentos (t) na saída da Sub-bacia do Rio Jauruçu.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de entrada de características físico-químicas do solo da Sub-Bacia do Rio Jauru para o SWAT	41
Tabela 2: Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da Estação Meteorológica de Altamira.....	43
Tabela 3: Análise de Evapotranspiração Potencial com intervalos de 10 anos.....	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

SWAT	Soil and Water Assessment Tool
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SNGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
ARS	Agricultural Research Service
HRUs	Unidades de Respostas Hidrológicas
BDIA	Banco de Dados de Informações Ambientais
MAPBIOMAS	Monitoramento Anual de Uso e Cobertura da Terra
DEM	Modelo Digital de Elevação
UTM	Universal Transversa de Mercator
OTB	Órfeo Toolbox
TMPMX	Temperatura máxima
TMPMN	Temperatura mínima
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima
TMPSTD MN	Desvio padrão da temperatura mínima
PCPMM	Precipitação média
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima
PCPD	Número de dias de precipitação
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas
SOLARAV	Radiação solar
DEWPT	Temperatura no ponto de orvalho
WNDV	Velocidade do vento
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
SWT	Quantidade de água no solo no fim do dia

SW0	Quantidade de água no início do dia
T	Tempo
PD	Precipitação no dia
QSUP	Representa o escoamento superficial
EA	Quantidade de água que evapotranspirou no dia
WVAD	Quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia
QSUB	Quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo
CN	Número de Curva
QSURF	Escoamento superficial total
PI	Precipitação total
IA	Abstração inicial
S	Parâmetro de retenção
QPICO	Vazão de pico
ATC	Fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração
QSUP	Escoamento superficial
A	Área da sub-bacia
TCON	Tempo de concentração
TCONC	Tempo de concentração na bacia
TCS	Tempo de concentração do escoamento terrestre
TCC	O tempo de concentração do escoamento no canal
QLAT	Quantidade de água que escoar subsuperficialmente
SWLY	Volume drenável de água na camada de solo (mm);
KSAT	Condutividade hidráulica saturada (mm.h ⁻¹);
SLP	Declividade média da sub-bacia (m.m ⁻¹); é a porosidade drenável
da camada de solo	
LHILL	Comprimento do declive
Qw	Escoamento subterrâneo no canal principal no dia
KSAT	Condutividade hidráulica saturada do aquífero
LGW	Distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal
principal	
Hwtbl	Altura do lençol freático (m).
SWly	Conteúdo de água na camada do solo
FCly	Conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo
Wperc,ly	Quantidade de água que percola para a próxima camada

SWly; excesso	Volume drenável de água na camada de solo
$t \Delta$	Duração do passo de tempo
Ttperc	Tempo de propagação na camada do solo
TT	Tempo de percolação
SATly saturado	Quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado
Ksat	Condutividade hidráulica saturada na camada
λE	Densidade do fluxo de calor latente
E	Profundidade da taxa de evaporação
Δ	Inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor
H_{net}	Radiação líquida
G	Densidade de fluxo de calor para o solo
ρ_{air}	Densidade do ar
cp	Calor específico (MJ/kg/°C),
e_{z0}	Pressão de vapor de saturação do ar na altura z
e_z	Pressão de vapor de água do ar na altura z
Γ	Constante psicrométrica
r_c	Resistência do dossel da planta
r_a	Resistência aerodinâmica
Sed	Aporte de sedimentos diária
Qsurf	Volume de escoamento superficial
Qpea	Vazão de pico
Area _{hr}	Área da unidade de resposta hidrológica
KUSL	Fator erodibilidade
CUSE	Fator de uso e manejo do solo
PUSLE	Fator de práticas conservacionistas
LSUSLE	Fator topográfico
CFRG	Fator de fragmentação esparsa

SUMÁRIO

1	Introdução.....	2
4	Objetivos.....	5
4.1	Objetivo Geral	5
4.2	Objetivos Específicos	5
5	Fundamentação Teórica	6
5.1	Uso e ocupação do solo na Amazônia e os efeitos da pecuária	6
5.2	Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise e Planejamento Ambiental	9
5.3	Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico.....	12
5.4	Modelos Hidrológicos e os SIGs.....	15
5.5	Modelo Soil and Water Assessment Tool - SWAT	17
6	Materiais e métodos	Erro! Indicador não definido.
6.1	Caracterização da área de estudo	20
6.1.1	Clima.....	22
6.1.2	Geologia.....	24
6.1.3	Geomorfologia	28
6.1.4	Tipos de Solos	30
6.1.5	Tipos de Vegetação	32
6.1.6	Uso e Ocupação do Solo.....	34
6.2	Procedimentos operacionais da Modelagem no SWAT	38
6.3	Resultados e Discussões	Erro! Indicador não definido.
7	Considerações Finais.....	Erro! Indicador não definido.
8	Referências Bibliográficas.....	73

1 Introdução

A Amazônia é a maior floresta tropical do planeta e desempenha um papel fundamental no equilíbrio climático global, na regulação do ciclo hidrológico e na preservação da biodiversidade (De Souza, 2023). Essa região contém uma diversidade ecológica incomparável, com uma rica variedade de ecossistemas que incluem florestas alagadas, campos de várzeas e bacias hidrográficas interligadas, somando assim uma grande variedade de recursos naturais.

No entanto, apesar da sua abundância, a região enfrenta pressões crescentes devido à intensa exploração dos seus recursos naturais. Desde a década de 1970, com o incentivo à abertura de rodovias e a projetos governamentais de desenvolvimento, a Amazônia tem sido transformada por atividades como o desmatamento, a expansão agrícola, a mineração (Prates, 2011) e a implementação de grandes empreendimentos, como usinas hidrelétricas. Essas intervenções têm provocado profundas alterações nos ecossistemas da região, acarretando impactos diretos no ciclo hidrológico, no clima e na qualidade ambiental.

Essas mudanças são evidenciadas pelos acelerados processos de mudança de uso e ocupação do solo, que afetam não apenas a paisagem, mas também diversas bacias hidrográficas (Rodrigues, 2005). A conversão de grandes áreas de floresta em pastagens e monoculturas é uma das principais causas dessas transformações, afetando não somente a biodiversidade, mas também o regime das águas, com consequências para a gestão dos recursos hídricos e para as comunidades que dependem diretamente desses recursos.

O processo de antropização, que se intensificou nas últimas décadas na região Amazônica trouxe consigo impactos significativos. Entre estes, destaca-se o alto índice de exploração madeireira e a conversão de extensas áreas de vegetação em campos destinados a atividades pecuárias (Laurance et al., 2014). Essas atividades geram inúmeros problemas ambientais, como a intensificação dos processos erosivos, o assoreamento dos corpos d'água, o surgimento de voçorocas de grande magnitude e a degradação da qualidade dos solos e da água (Roberts et al., 2002).

A dimensão desses impactos, no entanto, nem sempre é devidamente avaliada. Muitas vezes, as análises não abrangem todas as variáveis necessárias, como aspectos ambientais, sociais, culturais e econômicos. Por isso, as análises em bacias hidrográficas tornam-se cada vez mais imprescindíveis. Essas bacias são consideradas unidades de análise e planejamento ambiental, permitindo avaliar de maneira integrada as alterações, sobretudo em regiões que sofrem grandes impactos antrópicos, alterando o equilíbrio hidrológico (Vitte, 2007). Alves (2004) ressalta que, devido à sua grande potencialidade, as bacias hidrográficas são marcadas por um intenso uso e exploração dos seus recursos naturais, o que interfere na cobertura pedológica e no relevo, afetando diretamente a infiltração da água no solo, o armazenamento e, conseqüentemente, o fluxo de escoamento da água.

Um exemplo emblemático desses impactos é a sub-bacia hidrográfica do rio Jauruçu, localizada no sudoeste do Estado do Pará. Essa região, que forma um importante afluente da margem esquerda do Rio Xingu no seu baixo curso, tem sido historicamente marcada por um intenso processo de ocupação, que se acentuou principalmente a partir da construção da BR-230, também conhecida como rodovia Transamazônica (Alvarez, 2022). Esse novo cenário acelerou a expansão das atividades agropecuárias, especialmente a criação de gado e o cultivo de outras culturas, transformando grandes áreas de florestas em pastagens.

De acordo com Freitas (2022), a sub-bacia hidrográfica do Rio Jauruçu apresenta todas as características e consequências desse modelo de ocupação. A transformação de florestas em áreas de pastagens é um dos principais resultados desse processo. Diante disso, surge a necessidade de ampliar pesquisas voltadas para análises do potencial ambiental existente em bacias hidrográficas, centradas nos recursos hídricos. Essas pesquisas possibilitam avaliar o comportamento e as modificações que ocorrem em consequência dessas atividades, por meio de um diagnóstico integrado que possa fornecer informações concretas para o planejamento ambiental, utilizando a modelagem hidrológica. Além disso, essas análises auxiliam na compreensão da dinâmica dos rios e nas estimativas de perdas de solo (Cuartas et al., 2012), sendo também imprescindíveis para a gestão dos recursos hídricos (Castro Filho et al., 2013).

As diferentes formas de uso do solo geram uma série de impactos no equilíbrio hidrológico. Entre estes, destaca-se o aumento do escoamento superficial, a redução

da infiltração, a intensificação da erosão do solo e, conseqüentemente, o assoreamento dos corpos d'água (Lima, 2019). Além disso, o desmatamento contribui para alterações nos fluxos de evapotranspiração e no microclima da região, afetando a disponibilidade e a qualidade da água na sub-bacia. Esses impactos são particularmente graves na Amazônia, dada a importância ambiental da floresta e das suas bacias hidrográficas para a regulação hídrica em escala regional e global (Merengo, 2008).

Nesse contexto, compreender como as alterações no uso do solo influenciam os componentes do ciclo hidrológico torna-se essencial. Essa compreensão não apenas avalia os impactos causados pelas atividades antrópicas, mas também subsidia estratégias de gestão sustentável dos recursos naturais. Para isso, a integração de ferramentas como o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é fundamental. Amplamente utilizado para simulações hidrológicas, o SWAT permite analisar cenários passados e projetar efeitos futuros das alterações do uso do solo (Gasman et al., 2007).

O SWAT é um modelo conceitual de tempo contínuo desenvolvido para auxiliar gestores de recursos hídricos. Este avalia os impactos da gestão e do clima no processo de abastecimento de água e na poluição de fontes difusas em bacias hidrográficas (Arnold, 2005). Apesar de exigir dados diários da bacia, o que pode representar limitações devido à escassez de informações disponíveis, o modelo é eficiente em simulações de longa duração (Arnold et al., 1998). Na área de estudo, este modelo é empregado para prever o comportamento do sistema em um longo espaço de tempo.

Essa análise busca preencher lacunas existentes no monitoramento hidrológico e desenvolver ferramentas que possam contribuir para o planejamento ambiental em regiões de difícil acesso. A sub-bacia, estando situada em uma área de alta biodiversidade e relevância socioeconômica, reflete os desafios enfrentados em várias partes da Amazônia, onde o uso sustentável dos recursos naturais entra em conflito com a preservação ambiental. Diante disso, a aplicação do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se apresenta como um método eficaz para simular mudanças no balanço hídrico. Apesar da impossibilidade de calibração detalhada devido à falta de estações de monitoramento na região, os parâmetros padrão foram ajustados com base na literatura, garantindo a consistência dos resultados.

oferecendo informações para subsidiar a gestão hídrica em áreas amplamente desprovidas de monitoramento sistemático.

O estudo aborda a gestão de recursos hídricos na sub-bacia do rio Jauruçu, entre os anos de 1991 a 2021. Deste modo, a relevância deste estudo está na possibilidade de compreender como as alterações no uso do solo impactam os componentes hidrológicos. Esses dados são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em áreas que enfrentam períodos de seca, como as que vêm ocorrendo na região Amazônica nos últimos anos. Além disso, este estudo visa fornecer subsídios relevantes para uma melhor gestão dos recursos hídricos na região e a mitigação dos impactos ambientais causados pelas mudanças no uso do solo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Compreender como a dinâmica do uso e ocupação do solo da Sub-Bacia do Jauruçu-PA tem impactado no balanço hidrológico, a partir de uma análise multitemporal entre os anos de 1991 e 2021, mediante a aplicação do modelo SWAT.

2.2 Objetivos Específicos

1. Apresentar a estrutura geoambiental da área de estudo e a sua funcionalidade;
2. Analisar as principais mudanças no uso e ocupação do solo na Sub-Bacia do Rio Jauruçu entre 1991 e 2021, utilizando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento.
3. Avaliar a produção de sedimentos no exutório sub-bacia;

3 Fundamentação Teórica

3.1 Uso e ocupação do solo na Amazônia e os efeitos da pecuária

A dinâmica do uso e ocupação do solo na Amazônia tem sido amplamente influenciada por fatores históricos, socioeconômicos e ambientais, destacando-se o desmatamento e a conversão de florestas em áreas agrícolas e de pastagem como transformações prevalentes. Ribeiro (2021) e Dos Santos et al. (2018) enfatizam que as políticas públicas implementadas durante o processo histórico de colonização da região promoveram atividades agrícolas extensivas e a ocupação de terras, frequentemente resultando na substituição das florestas nativas. Essa realidade é corroborada pelo avanço das fronteiras agrícolas e a busca por geração de renda, conforme também destacado por Dos Santos et al. (2018). Essas transformações carregam implicações substanciais para os ciclos hidrológicos locais e regionais, ocasionando desequilíbrios na disponibilidade de recursos hídricos e no fornecimento dos serviços ecossistêmicos. Além disso, a Amazônia, com sua alta biodiversidade e seu papel crucial na regulação climática global, apresenta uma grande vulnerabilidade diante das alterações no uso do solo, o que reforça a relevância de estudos sobre as mudanças históricas e ambientais na região.

O processo de ocupação da Amazônia intensificou-se a partir da década de 1970, impulsionado pela construção de rodovias, como a BR-230, também conhecida como Transamazônica, que facilitou o avanço da agropecuária na região. Como consequência, a Amazônia passou por um acelerado processo de mudanças, resultando na perda de aproximadamente 22,37% da sua área natural, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com base em dados do PRODES (2022).

O desmatamento concentrou-se no chamado “arco do desmatamento”, uma faixa que se estende pelo sul da região, entre os estados do Maranhão e de Rondônia, sendo uma área de transição entre dois grandes biomas brasileiros: a Amazônia e o Cerrado. Ferreira et al. (2005) discutem as causas da fragmentação da floresta nessa região:

“ O processo de desmatamento normalmente começa com a abertura de estradas seja oficial ou clandestina que permitem a expansão humana e a ocupação irregular de terras à exploração predatória de madeiras nobres. Posteriormente, converte-se a floresta explorada em agricultura familiar e pastagens para a criação extensiva de gado, especialmente em grandes propriedades, sendo este fator responsável por cerca de 80% das florestas desmatadas na Amazônia legal. Recentemente, as pastagens estão a dar lugar à agricultura mecanizada, principalmente àquela ligada às culturas de soja e algodão. [...] (Ferreira et al., 2005)

Diante desse cenário, intensificaram-se estudos voltados para as formas de uso e ocupação do solo. Entretanto, somente a partir da década de 1980, efetuaram-se análises mais aprofundadas nesse campo de estudo, passando a abranger mais sistematicamente não apenas os altos índices de desmatamento, mas também a diminuição da biodiversidade, a degradação e perda do solo por erosão, o assoreamento dos rios, a emissão de gases de efeito estufa, a redução da capacidade biológica dos sistemas naturais, dentre outros (Caldas et al., 2003; Lambin e Geist, 2006; Uriarte et al., 2010).

Conforme Dias Filho e Andrade (2006), 80% das áreas de desmatamento na Amazônia são destinadas para pastagens, com uma estimativa de que metade dessas áreas estejam degradadas e algumas encontrando-se abandonadas. Nesse panorama, levantamentos mais recentes do Projeto MapBiomas sobre as formas de uso e ocupação do solo na região apontam que, entre os anos de 1985 e 2023, cerca de 90% das áreas desmatadas foram transformadas em pastagem, passando de 12,7 milhões de hectares na década de 1980 para 59 milhões de hectares no cenário mais atual da Amazônia. Essas atividades são reportadas como sendo a causa de significativas perdas de biodiversidade e de mudanças na paisagem (Da Veiga, 2000).

Os impactos das diferentes formas de uso do solo na Amazônia podem ser ainda mais amplos, envolvendo o clima e o ciclo hidrológico, afetando a disponibilidade de recursos hídricos em escala regional e global. Marengo (2010) sustenta que a floresta úmida amazônica desempenha um papel vital no equilíbrio climático global, impulsionando as circulações atmosféricas tropicais por meio da

aquisição de energia solar e da reciclagem de aproximadamente metade da precipitação que cai na floresta. Contudo, atividades humanas, como urbanização, pecuária, agricultura e desenvolvimento econômico intensivo, causam impactos significativos nessa dinâmica e na cobertura vegetal. O desmatamento em grande proporção, resultante dessas práticas, afeta o clima em várias escalas, pois a queima de biomassa insere um excesso de gases de efeito estufa (GEEs) e aerossóis, o que pode intensificar as mudanças decorrentes da variabilidade climática natural.

Ainda conforme o mesmo autor, a expansão da fronteira agrícola, impulsionada pela monocultura da soja, intensifica a pressão sobre os ecossistemas amazônicos, promovendo cada vez mais o desmatamento. . Pesquisas como a de Jovino et al. (2022) indicam que as alterações no uso do solo nessa região, modificam significativamente os fluxos hidrológicos, aumentando a impermeabilização do solo e, consequentemente, o escoamento superficial. Esses autores argumentam que pastagens degradadas na região, ao reduzirem a capacidade de infiltração do solo, contribuem para o aumento do volume de escoamento superficial. O impacto direto inclui uma maior produção de sedimentos e exacerbação da erosão, frequentemente relacionados à remoção da cobertura vegetal.

Outras consequências disso são as ameaças de perda e redução da diversidade de espécies de peixes em áreas essenciais para a pesca, o acúmulo de sedimentos nos leitos dos rios e a contaminação de reservatórios pelos altos níveis de mercúrio, o que ocorre principalmente em áreas que contêm atividades de mineração, como áreas de garimpo, além dos impactos profundos sobre as populações tradicionais — ribeirinhos, quilombolas e povos indígenas.

Portanto, o grande aumento da degradação das florestas tropicais está intrinsecamente ligado ao modelo econômico mundial, que visa a exploração constante e desenfreada dos seus recursos naturais, impactando diversas bacias hidrográficas. Nesse sentido, esses sistemas são diretamente afetados justamente por serem considerados os ecossistemas mais abundantes e ricos de todo o planeta (ALVES, 2004). As mudanças do uso do solo, em conjunto com as mudanças climáticas, são os principais elementos capazes de provocar alterações no comportamento do ciclo hidrológico de uma região hidrográfica (Neupane; Kumar, 2015; Gomes et al., 2021; Briones; Ella; Bantaya, 2016).

Diante dessas problemáticas causadas pelas variadas formas de uso do solo, Paiva et al. (2023) destaca o potencial das estratégias de conservação florestal e reflorestamento na redução desses impactos, servindo como alternativas eficazes para mitigar os efeitos deletérios das mudanças no uso do solo em bacias hidrográficas amazônicas.

3.2 Bacia hidrográfica como unidade de análise e planejamento ambiental

O conceito de bacias hidrográficas como unidades de planejamento ganhou forma histórica durante as disputas imperialistas entre França e Grã-Bretanha a partir do século XVII. Nesse contexto de expansão do sistema-mundo, as bacias hidrográficas foram incorporadas como ferramentas estratégicas para a regionalização dos territórios nacionais, destacando-se o caso francês, onde a bacia hidrográfica passou a ser amplamente reconhecida como equivalente a uma região natural (Vitte, 2017). Nesse cenário, o pioneiro nos estudos voltados para a análise e caracterização de bacias hidrográficas foi Phillipe Bauche (1707–1778).

Durante a grande inundação de Paris, que ocorreu em 1744, Bauche (1752) realizou mapeamentos de toda a capital francesa e, com isso, chegou à conclusão de que as variações na morfologia da crosta terrestre são resultantes da dissecação fluvial, originando bacias hidrográficas compostas por topos, vertentes e fundos de vale. Este destacou que essas bacias podem ser delimitadas em cartas topográficas e que o agrupamento de bacias sob condições climáticas e geológicas semelhantes possibilita a regionalização do território em regiões naturais.

Com o tempo, surgiram diversas definições para bacias hidrográficas. De forma geral, de acordo com Tucci (1997), uma bacia hidrográfica pode ser definida como uma área natural de captação da água proveniente da precipitação, direcionando o escoamento para um único ponto de saída. É formada por superfícies vertentes e por uma rede de drenagem composta por cursos d'água que se conectam até convergir em um único leito no exutório.

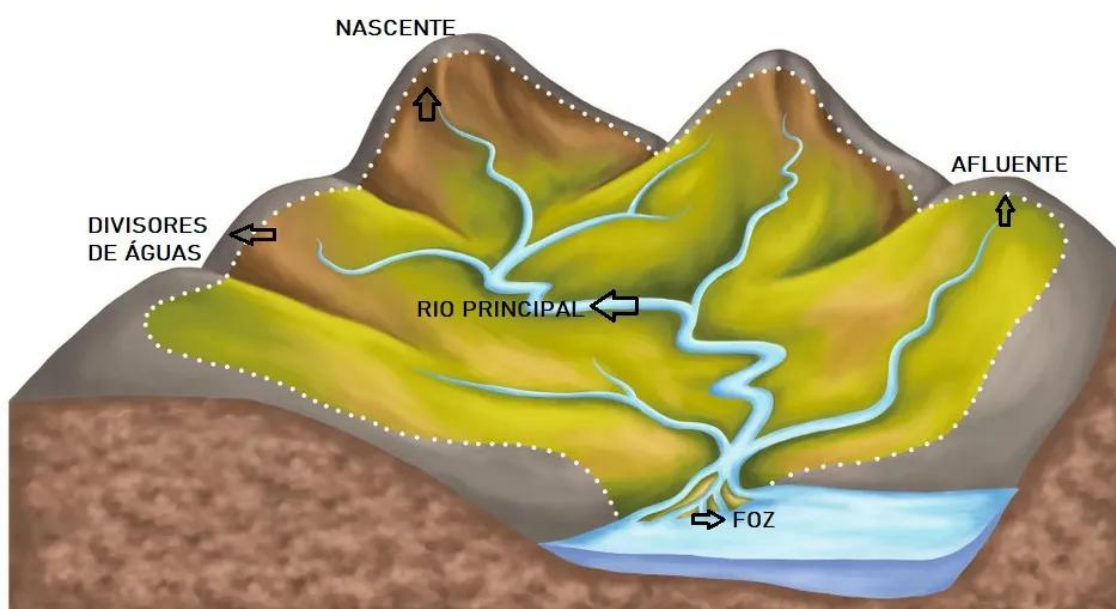
Barrella (2001) as define como áreas de terra drenadas por um rio e seus afluentes, formadas nas regiões mais elevadas do relevo e delimitadas pelos divisores

topográficos de água. Esse processo ocorre à medida que as águas das chuvas escoam superficialmente ou se infiltram no solo.

Entretanto, outros autores agregam mais informações sobre esse tema, como Lima e Zakira (2000), que abordam o conceito geomorfológico de uma bacia hidrográfica a partir de uma abordagem sistêmica. Ou seja, as bacias hidrográficas podem ser consideradas sistemas abertos, nos quais há uma contínua entrada e saída de energia, podendo ser descritas por diversas variáveis interdependentes que se relacionam entre si. Qualquer modificação no recebimento ou liberação de energia, até mesmo em decorrência das ações antrópicas, tende a ser neutralizada e minimizada, permitindo o retorno ao seu estado de equilíbrio dinâmico.

Dessa forma, formam-se os divisores de água, ou seja, as águas escoam para um rio ou para outro, delimitando as bacias hidrográficas. Observa-se na FIGURA 1.

Figura 1: Principais componentes da Sub-bacia do Jauruçu.



Fonte: Mundo Educação. "bacia hidrográfica". Disponível em

<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/bacia-hidrografica.htm>.

De acordo com informações do IBGE (2021), as formas de relevo, contendo diferentes tipos de declividade, provocam subdivisões em diversas bacias hidrográficas. O relevo que separa as águas que caem na superfície determina por

onde essas águas escoarão até chegarem ao seu percurso final. No caso brasileiro, essas águas são despejadas no oceano Atlântico.

É importante compreender o funcionamento desses sistemas, principalmente diante das constantes e intensas alterações causadas pelas atividades antrópicas, que vêm gerando efeitos cada vez mais irreversíveis, especialmente em sistemas com grande potencial ecológico, como a bacia hidrográfica do Rio Amazonas. Essa bacia abriga o maior rio em volume de água do planeta e possui a maior diversidade de espécies.

Assim, nesse contexto, foi instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que estabelece princípios e normas para uma melhor gestão dos recursos hídricos. A PNRH define as bacias hidrográficas como unidades de planejamento e gestão ambiental.

Diante da necessidade de melhor compreensão e gestão desses sistemas hidrográficos, foi criado o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), responsável por gerir e promover a articulação do planejamento dos recursos hídricos. No que se refere ao modelo de análise, a Resolução CNRH nº 32, de 2003, estabeleceu as "Regiões Hidrográficas", subdivididas em 12 no território brasileiro. O objetivo dessa medida é "estabelecer uma base organizacional que contemple bacias hidrográficas como unidade de gestão de recursos hídricos para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH)", possibilitando melhor análise, organização, redelimitação, recodificação e geocodificação das bacias hidrográficas. Para isso, é fundamental compreender o funcionamento do ciclo hidrológico de um sistema.

No entanto, ao considerar esses sistemas como unidades para análise espacial, é possível observar que atividades como a pecuária e a agricultura são grandes geradoras de impactos ambientais, causando desequilíbrios na dinâmica natural dessas áreas. O crescimento das áreas agrícolas e das pastagens contribui para problemas ambientais como desmatamento, queimadas em áreas de florestas e vegetação nativa, poluição — principalmente devido ao uso intensivo de agrotóxicos, intensificação dos processos de erosão e degradação dos solos e, consequentemente, contaminação das águas e assoreamento dos corpos hídricos (Firmino et al.; Fonseca, 2008).

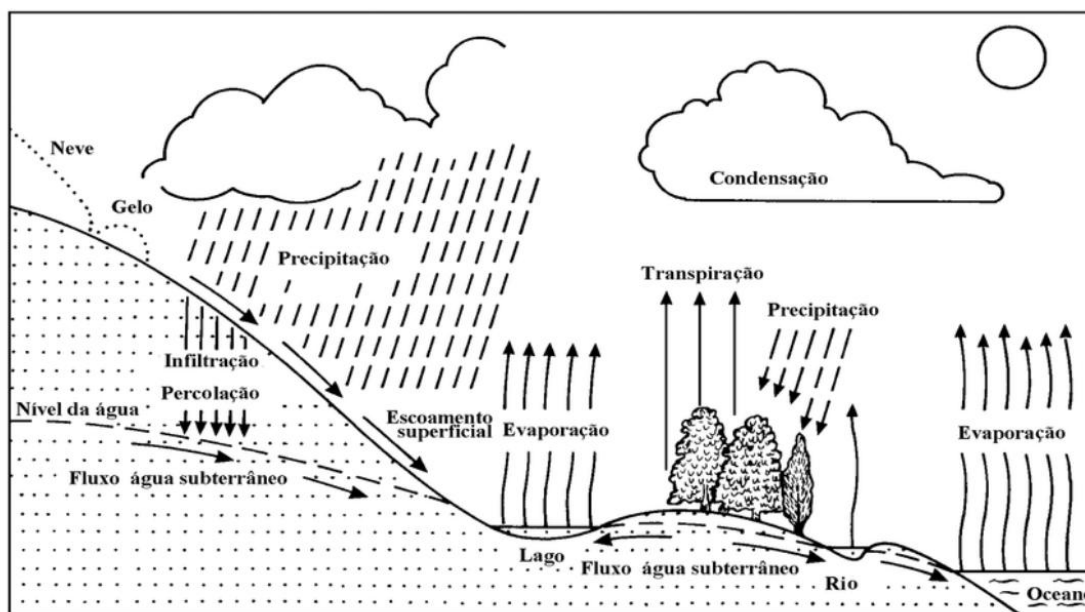
3.3 Ciclo hidrológico e balanço hídrico

A água passa por constantes transformações em um processo conhecido como ciclo hidrológico. Para Tundisi (2009), a água é o recurso mais valioso da Terra, indispensável para a sobrevivência de todos os seres vivos. Trata-se de um recurso natural renovável, cuja renovação ocorre por meio de processos biogeoquímicos, impulsionados por variações de temperatura e pressão, em interação com elementos bióticos e abióticos do ambiente. Esses processos permitem que a água transite entre os estados sólido, líquido e gasoso, compondo o ciclo hidrológico. Esse ciclo natural assegura a regeneração, reposição e recuperação da água, configurando-se como um dos serviços ecossistêmicos mais essenciais para a humanidade.

O ciclo hidrológico pode ser definido como um conjunto de fenômenos bioquímicos que ocorrem no processo de circulação fechada entre a água, a atmosfera e a superfície terrestre (Tucci, 2009). O ciclo da água é fundamental para o retorno da água à superfície terrestre e, nesse processo, ao cair no solo, a água escorre, formando rios e córregos, que passam pelos diversos desníveis do terreno (montanhas, serras, colinas e chapadas), sendo drenados diretamente para o ponto mais baixo do relevo (exutório).

A chuva é o principal fator para que a água adentre o ciclo hidrológico, passando por diversas fases. Inicialmente, com o calor do sol, a água passa do estado líquido para o gasoso (evaporação). O vapor sobe para a atmosfera, passando novamente para o estado líquido (condensação) e, com a diminuição da temperatura, forma gotículas de água e gelo (formação das nuvens), retornando à superfície terrestre na forma de chuva, orvalho, neve ou, na sua forma sólida, granizo. Nesse processo, uma parte da água em formato de chuva evapora antes de chegar à superfície; outra parte é retida pela vegetação, que libera água por meio da transpiração (evapotranspiração); e apenas uma parte chega ao solo, direcionando-se para as áreas mais baixas da superfície, indo para os rios e riachos ou infiltrando-se no solo por meio de poros, fissuras e fraturas, compondo o lençol freático ou aquíferos (Tucci, 2009). A FIGURA 2 apresenta as etapas do ciclo hidrológico.

Figura 2: Esquema do ciclo hidrológico.



Fonte: Tucci, 2004.

Esse ciclo é sustentado principalmente pelos processos de evaporação e precipitação, que garantem a contínua circulação da água no planeta. A radiação solar desempenha um papel fundamental ao fornecer a energia necessária para essas dinâmicas, sendo que grande parte dessa energia é utilizada na evaporação da água dos oceanos, o principal componente quantitativo do ciclo hidrológico (Setti et al., 2001).

Entretanto, o ciclo hidrológico tem sofrido profundas alterações em diversas regiões, especialmente nas últimas décadas, como consequência das múltiplas intervenções humanas no ambiente. Entre as principais causas estão a urbanização

intensiva, a dragagem de áreas alagáveis, a destruição de florestas e a construção de grandes reservatórios artificiais, como represas.

Com o reconhecimento e a compreensão do ciclo hidrológico de uma determinada região, pode-se realizar o balanço hídrico, que, conforme os autores Thornthwaite e Mather (1955), é definido como a somatória da quantidade de água que entra e sai do sistema. Nesse processo, a entrada ocorre por meio da precipitação e/ou irrigação, enquanto a saída acontece pela evapotranspiração. Uma das principais aplicações desse tipo de análise é calcular e identificar os locais onde uma cultura pode ser explorada com maior eficiência.

Na visão de Pinto (1976), compreender o balanço hídrico é fundamental para avaliar os impactos das atividades humanas no meio ambiente, pois afeta diretamente a disponibilidade de recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental. Diante disso, os principais objetivos do balanço hídrico são analisar o regime hidrológico e a disponibilidade hídrica em uma determinada região. Essas informações são essenciais para atender às demandas de uso e subsidiar a elaboração de projetos, estudos e estratégias para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, a estimativa dos volumes renováveis de recursos hídricos pode ser realizada utilizando dados meteorológicos ou pela determinação do volume de drenagem dos rios. Conforme Tundisi e Tundisi (2011), para a execução de um balanço hídrico em uma região, é fundamental considerar os seguintes aspectos:

Disponibilidade de dados confiáveis: É essencial dispor de séries históricas longas, com dados frequentes e de alta qualidade.

Localização das estações pluviométricas: As estações devem estar bem distribuídas nas áreas onde será conduzido o estudo, garantindo a representatividade dos dados.

Observações do sistema de drenagem natural: É necessário monitorar as vazões dos rios e outros corpos d'água da região.

Informações sobre usos múltiplos da água: Deve-se ter acesso a dados quantitativos que detalhem os diferentes usos da água e os impactos associados na área de estudo.

A partir dessas informações, pode-se elaborar a equação do balanço hídrico, que se baseia no princípio da conservação da massa ou da continuidade, no qual, em

um determinado sistema, a diferença entre a entrada e a saída de água corresponde à variação do armazenamento dentro do sistema.

3.4 Modelos hidrológicos e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

O entendimento de como funcionam os processos hidrológicos é fundamental para os estudos ambientais e para compreender as mudanças que ocorrem devido à forma de uso do solo, auxiliando, por exemplo, na gestão dos recursos hídricos e na condução dos projetos hidráulicos. Conforme as considerações de Lima (2010), é necessário identificar, primeiramente, o objetivo do estudo do modelo e os resultados esperados. Após isso, é necessário avaliar a disponibilidade dos dados sobre a área de estudo, a precisão desejada, a capacitação do corpo técnico para operar e interpretar o modelo, o tempo necessário para a modelagem e a certificação de equipamentos capacitados para a realização do processamento.

A interrelação da dinâmica dos elementos existentes no sistema, componentes e poluentes é importante para as análises hidrológicas e, assim, a modelagem hidrológica torna-se imprescindível para estudos mais aprofundados a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e da previsão de cenários (Moraes, 2003). Os modelos são ferramentas importantes para estudos voltados para o entendimento das interações dos elementos físicos existentes em um sistema. Para isso, é essencial a organização de um banco de dados que contenha as características precisas da área de estudo e, a partir de sua eficácia, esses modelos podem simular eventos e cenários futuros, trabalhando com previsões. Além dessa análise espacial, essa ferramenta tem um baixo custo (Mendes; Cirilo, 2001).

Os modelos hidrológicos são compostos por dados matemáticos para representar o comportamento de um determinado sistema e reproduzir uma resposta, dado um estímulo, uma entrada de energia ou informação (Tucci, 1997). Assim, a modelagem pode ser definida como a representação de um sistema físico por meio de equações, mostrando o comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, seja ele real ou abstrato. Do ponto de vista do mesmo autor, há dificuldades em modelar uma bacia hidrográfica, pois ela envolve diferentes processos, principalmente devido às suas especificidades, o que gera o

desenvolvimento de inúmeros modelos. Esses modelos diferenciam-se nas suas bases de dados para discretização e nas prioridades de representação, conforme o objetivo de cada pesquisa a ser realizada.

Inúmeros autores abordam os tipos de modelos computacionais e como podem ser utilizados. Por exemplo, Singh (1995), na sua obra *Computer Models of Watershed Hydrology*, apresenta os principais modelos computacionais usados para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, em diferentes escalas. O autor faz uma análise detalhada sobre os fundamentos teóricos e matemáticos existentes nesses modelos, levando em consideração processos como precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, além de sua interação no sistema hidrológico. Além disso, Singh analisa a estrutura, a aplicabilidade e as limitações de diferentes modelos, destacando a sua utilidade em problemas práticos de gestão de recursos hídricos.

O autor Viessman Jr. e Lewis (1996), no seu livro *Introduction to Hydrology*, contribui significativamente para o tema. A obra é uma introdução ampla à ciência hidrológica, facilitando a compreensão dos princípios básicos da hidrologia. Esta apresenta os fundamentos do ciclo hidrológico e os principais processos associados, como precipitação, evaporação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, além de explorar técnicas de análise e métodos de modelagem hidrológica. O foco está na aplicação prática para o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos.

Além desses modelos, utiliza-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG), constituído por um conjunto de tecnologias que podem ser utilizadas na coleta, armazenamento, edição, processamento, análise, modificação e disponibilização de dados e informações existentes no espaço geográfico (Zaidan, 2017). Essas ferramentas são compostas por hardware, software, peopleware e dataware. Diante disso, o surgimento das geotecnologias cresce juntamente com a evolução tecnológica. Os autores Burrough e McDonnel definem os SIGs como:

“Um aglomerado eficaz de ferramentas para a coleta, armazenamento, recuperação, transformação e interpretação do mundo real a partir de dados espaciais existentes no mundo real para um conjunto de propósitos específicos.” (BURROUGH; MCDONNEL, 1998, PÁG. 11)

No que tange às tomadas de decisão, a aplicação dos SIGs é uma excelente ferramenta que pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento, pois possibilita uma análise precisa e aprofundada. Dessa maneira, pode-se obter mais clareza e precisão na tomada de decisões (Silva, 1999). De acordo com Fitz (2018), a utilização dessas ferramentas é essencial para o planejamento, gestão, monitoramento, manejo e caracterização dos espaços urbanos ou rurais.

3.5 - SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O Soil and Water Assessment Tool – SWAT foi desenvolvido em 1996 nos Estados Unidos pelo Agricultural Research Service (ARS) da Texas A&M University, liderado pelo Dr. Jeff Arnold e sua equipe no Grassland, Soil and Water Research Laboratory, em Temple, Texas, com suporte técnico do Departamento de Agricultura dos EUA. O principal objetivo do SWAT é prever os impactos do uso e manejo do solo sobre o ciclo hidrológico, o transporte de sedimentos e a qualidade da água em bacias hidrográficas.

O SWAT é um modelo semiconceitual, semidistribuído e contínuo no tempo, criado com o intuito de medir e analisar os impactos decorrentes da dinâmica do uso e manejo do solo na produção de água em bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 1998). Conforme o mesmo autor, a modelagem do SWAT é realizada a partir da equação do balanço hídrico, tendo como volume de controle um perfil de solo de 2 m de espessura.

De acordo com Neitsch et al. (2005), o SWAT é um modelo contínuo, sendo capaz de simular os efeitos e mudanças no uso e manejo do solo em períodos prolongados. Apesar disso, o modelo não é capaz de simular eventos isolados de precipitação.

Ainda segundo Neitsch et al. (2005b) e Dhar (2009), o modelo SWAT foi criado para realizar simulações de diversos processos hidrológicos, como escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo na rede de drenagem. O modelo também realiza análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas, bactérias, práticas agrícolas e qualidade da água.

Arnold et al. (1998) mencionam que esse modelo é utilizado principalmente por sua eficiência em simulações de vários anos. No entanto, apesar de exigir dados diários da bacia — o que pode representar uma limitação devido à escassez de informações disponíveis —, ele é empregado para prever o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Ainda segundo as considerações de Arnold et al. (1998), o modelo SWAT é construído a partir da equação do balanço hídrico, utilizando como volume de controle um perfil de solo de 2 m de profundidade. Esse modelo é amplamente utilizado devido à sua eficácia em simulações de longo prazo, mas sua aplicação pode ser restringida pela necessidade de dados diários da bacia. No entanto, mesmo diante da escassez de informações, o SWAT é empregado para antecipar o comportamento do sistema em períodos prolongados.

De acordo com Machado (2002), o SWAT é um modelo matemático capaz de simular diferentes processos, dependendo do objetivo do estudo. Além disso, ele permite analisar os impactos causados pelas formas de uso do solo em uma bacia hidrográfica, influenciando o escoamento superficial e subterrâneo, a produção de sedimentos e a disponibilidade e qualidade da água. Uma de suas principais características é a possibilidade de aplicação em bacias sem monitoramento direto, utilizando dados de entrada geralmente disponíveis e sendo computacionalmente eficiente em diferentes escalas. Além disso, é um modelo contínuo no tempo, permitindo simulações de longos períodos.

A bacia hidrográfica é subdividida em várias sub-bacias, o que confere maior representatividade aos processos simulados. Os autores Paiva e Paiva (2006, p. 3) mencionam que, a partir dessas subdivisões, os dados necessários são agrupados conforme as suas categorias, sendo elas: clima, unidades de respostas hidrológicas (HRUs), armazenamento, água subterrânea e canal principal.

Desde a sua criação, o modelo vem sofrendo inúmeras modificações, que variam de acordo com a finalidade de seu uso e os diferentes cenários de aplicação. Os principais pesquisadores globais sobre o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) têm contribuído significativamente para seu desenvolvimento, aplicação e aprimoramento em diferentes contextos hidrológicos, ambientais e de gestão de recursos hídricos.

No Brasil, têm aumentado cada vez mais os estudos e análises realizados com o modelo SWAT, mesmo em condições de escassez de dados, contribuindo para a gestão e planejamento dos recursos hídricos. Autores como Rodrigues et al. (2015) realizaram estudos sobre os impactos do uso e cobertura do solo no regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Pará, localizada no Alto do Rio São Francisco. O foco da pesquisa foi analisar as alterações resultantes das florestas plantadas, cujos resultados indicaram que essas áreas influenciam o consumo de água, afetando a disponibilidade hídrica local. O modelo utilizado pelo autor foi o SWAT, no qual destacou sua aplicabilidade em bacias hidrográficas com intensas atividades antrópicas, auxiliando na compreensão dos impactos de diferentes formas de uso do solo no ciclo hidrológico.

O autor Baldissera (2005), ao realizar estudos utilizando o modelo SWAT, discutiu a sua aplicação na bacia do Rio Cuiabá, utilizando-o para simular o balanço hídrico, a erosão do solo e o transporte de sedimentos e nutrientes. O autor também analisou os impactos das mudanças no uso do solo, das práticas agrícolas e do desmatamento, além de fornecer subsídios para uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

O trabalho realizado por Santos (2023) teve como objetivo simular o comportamento hidrológico na sub-bacia do Rio Araepó, localizada em Salinópolis-PA. A autora destacou o uso do modelo para avaliar o balanço hídrico, identificar os pontos críticos de erosão e compreender os impactos das atividades antrópicas no regime hidrológico. Esses trabalhos têm em comum, além da análise do comportamento do modelo em regiões com déficit de dados — principalmente no Norte do país —, a contribuição para a gestão sustentável dos recursos hídricos e a conservação ambiental desses sistemas, que contêm extensas atividades antrópicas.

4 Materiais e métodos

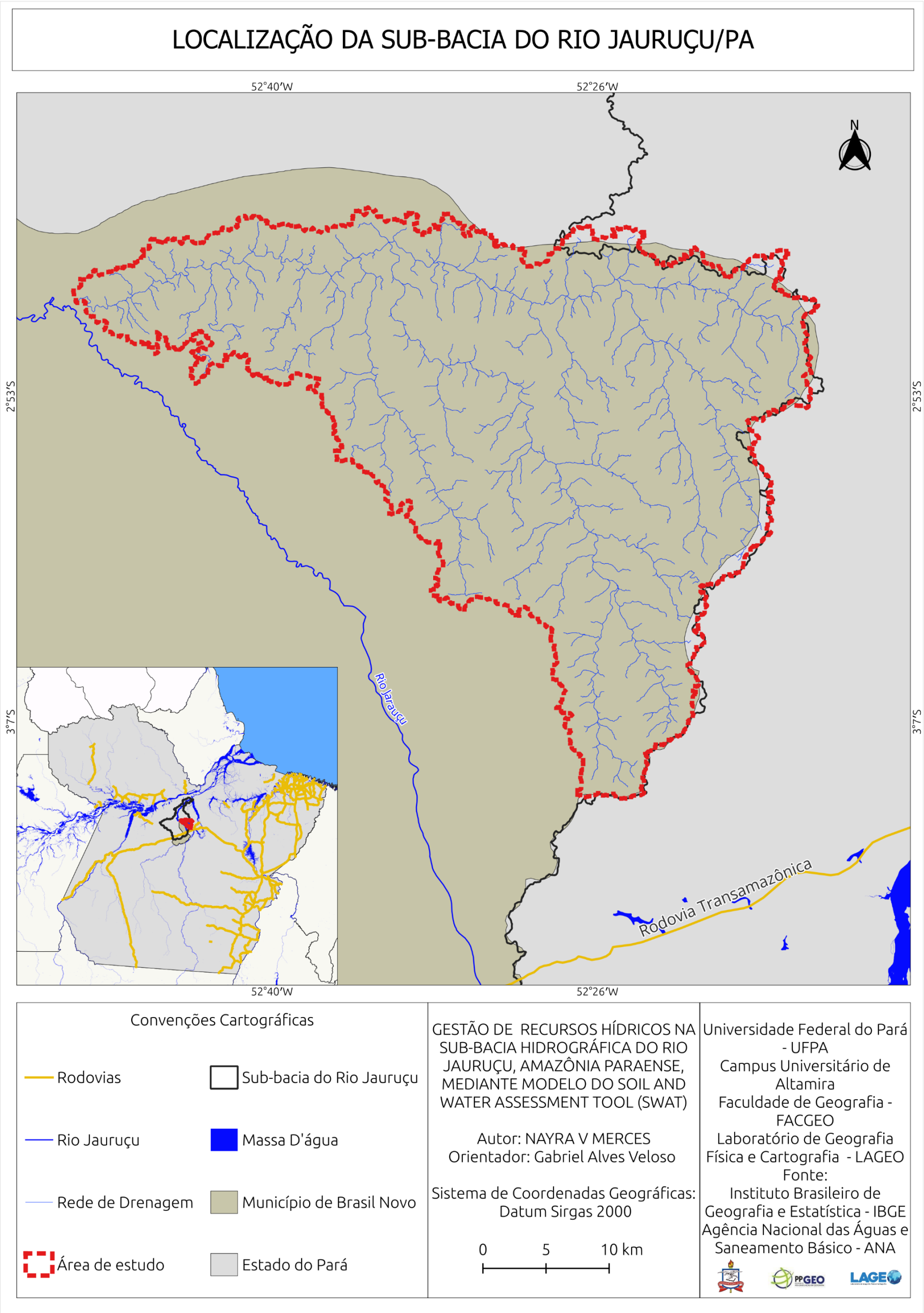
Diante da proposta de realizar o balanço hídrico na sub-bacia utilizando o modelo SWAT+, neste item, será abordada a sequência de desenvolvimento do trabalho, com metodologia baseada em pesquisa descritiva e abordagem qualitativa do estudo de caso, bem como dos resultados obtidos com a modelagem do SWAT+.

No primeiro momento, é apresentada a caracterização da área de estudo e dos seus aspectos relevantes para a compreensão dos processos hidrológicos da região. Na sequência, são abordados os estudos sobre o modelo SWAT+, incluindo seus módulos, a elaboração das fontes dos dados de entrada, bem como o tratamento e o pré-processamento dos arquivos necessários. Por fim, detalha-se a inicialização, a configuração e a simulação do modelo. Relativamente aos dados de imagens de satélite, a escolha das datas ocorreu devido à obtenção das melhores imagens, as quais contêm menor teor de nuvens.

4.1 Caracterização da área de estudo

A Sub-bacia do Rio Jauruçu está localizada no Sudoeste do Estado do Pará, entre os municípios de Altamira e Brasil Novo, conforme apresentado na FIGURA 3, estando a mais de 800 km de distância da capital Belém, sendo o principal afluente da margem esquerda do Rio Xingu no seu baixo curso. Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA), a sub-bacia hidrográfica do Rio Jauruçu, apresentada na FIGURA 3, é classificada segundo o sistema Otto Pfafstetter, aderindo às sub-bacias e pertencendo à 'Ordem 6', conforme consta na Resolução CNRH nº 30/2002.

Figura 3: Mapa de localização da Sub-Bacia do Rio Jauruçu.



Fonte: Elaborado pela autora.

Popularmente conhecida como sub-bacia do Rio Jauruçu, a sub-bacia é afluente da bacia hidrográfica do Rio Jauruçu, classificada como de “Ordem 5”. Embora a delimitação utilizada pela ANA inclua a sub-bacia e esta contribua para a drenagem e o transporte de sedimentos para o rio principal, o Jauruçu, essa sub-bacia não possui monitoramento fluviométrico, mas conta com uma estação fluvial localizada no trecho mais a jusante do rio Jauruçu, na Reserva Extrativista Verde Para Sempre.

Contudo, devido à distância da área de estudo, isso não permite um monitoramento completo e mais perspicaz, utilizando as variáveis fluviométricas referentes ao rio. Com aproximadamente 1.254 km², apesar da delimitação utilizada pela ANA (sistema Otto Pfafstetter), a delimitação empregada no processo de modelagem foi feita a partir do modelo SWAT+, utilizando o Modelo Digital de Elevação. Essas etapas serão melhor detalhadas nos próximos capítulos. Essa forma de delimitação foi utilizada porque o modelo não se ajusta a bacias hidrográficas com extensões de aproximadamente 10.000 km², ocorrendo, assim, algumas incompatibilidades com o relevo de delimitação. Esta região é marcada historicamente pela realização de atividades extrativistas. Contudo, após a abertura das rodovias, essas atividades transformaram-se, aos poucos, majoritariamente em cultivos agrícolas e criação de gado bovino (Figueira e Herrera, 2006).

Nesse cenário, a sub-bacia do Jauruçu tornou-se propícia para diversas formas de uso e ocupação, gerando uma série de alterações na dinâmica ambiental natural e contribuindo para conflitos ambientais decorrentes da intensa exploração paisagística voltada para fins econômicos, que ocorre em diferentes escalas (Alvarez, 2022).

4.2 Clima

A regulação do clima está diretamente relacionada à quantidade de água presente nos ecossistemas. Assim, a Amazônia é fundamental para o equilíbrio do ciclo hidrológico não somente do Brasil, mas também dos países vizinhos. As constantes alterações que ocorrem nesse sistema a partir das ações antrópicas afetam não somente de maneira local, mas também em regiões mais distantes, como no Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil. O clima da região é do tipo Aw – considerado um clima tropical com inverno seco –, e o estado térmico é próximo ao

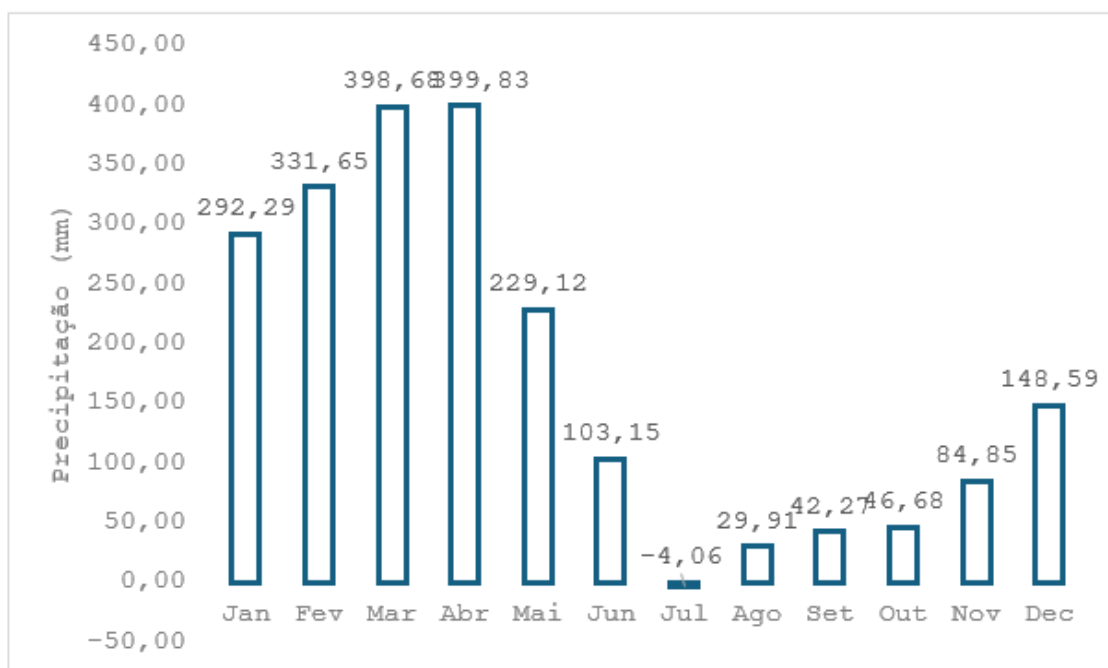
tipo Af, caracterizado como úmido e superúmido, conhecido como clima equatorial (Falesi et al., 1967).

A pluviometria anual pode chegar a cerca de 3.000 mm. No que tange ao contexto local, a sub-bacia destaca-se por possuir como principal característica um clima quente e úmido, o que determina as estações bem definidas: o período seco, de junho a novembro, e o período chuvoso, de dezembro a maio (Nimer, 1989). A sub-bacia hidrográfica do rio Jauruçu apresenta um clima equatorial úmido, com altas temperaturas, umidade elevada e precipitação abundante ao longo do ano.

A pressão atmosférica é estável, e a radiação solar é intensa, refletindo as características típicas da região amazônica. Esses fatores climáticos são essenciais para a manutenção da biodiversidade e dos ecossistemas locais, além de influenciarem as atividades humanas na região. A sub-bacia do rio Jauruçu está inserida em uma região de clima equatorial quente, caracterizado por altas temperaturas, com médias de 18 °C, e umidade elevada durante todo o ano. Esse clima é influenciado pela proximidade com a linha do Equador e pela presença da Floresta Amazônica.

A região apresenta elevados índices pluviométricos, com médias anuais que podem variar entre 2.000 mm e 2.500 mm. As chuvas são distribuídas relativamente de forma uniforme durante todo o ano, com períodos mais chuvosos (que geralmente ocorrem de dezembro a maio) e menos chuvosos (que vão de junho a novembro), mas sem uma estação verdadeiramente seca, conforme apresentado no FIGURA 4, que está a ser analisado as médias mensais de um período de 30 anos.

Figura 4: Precipitação média mensal da Região.



Fonte: Elaborada pela Autora.

As temperaturas médias anuais na região variam entre 25 °C e 28 °C, com pouca variação ao longo do ano devido à proximidade com o Equador. A amplitude térmica diária é maior do que a anual, com temperaturas diurnas podendo atingir até 32 °C e noturnas caindo para cerca de 22 °C a 24 °C. A presença de rios e florestas pode moderar as temperaturas, criando microclimas com variações sutis.

A umidade relativa do ar é geralmente alta, variando entre 80% e 90% ao longo do ano. Isso se deve à intensa evapotranspiração da floresta e à alta taxa de precipitação. A Floresta Amazônica desempenha um papel crucial na manutenção da umidade, liberando grandes quantidades de vapor d'água para a atmosfera.

4.3 Geologia

De acordo com pesquisas realizadas por Alvarez (2022), não há indícios de atividades geológicas recentes na sub-bacia, principalmente em sua foz, apesar da formação e expansão de planícies fluviais ao longo do percurso longitudinal da sub-bacia do Rio Jauruçu.

A FIGURA apresenta o mapa das Unidades Geológicas da Sub-Bacia do Rio Jauruçu. Observam-se no mapa distintas unidades geológicas, destacando-se nessa região a predominância da Formação Alter do Chão, do Cretáceo, caracterizada por arenitos avermelhados de granulometria fina a média, além da presença de argilitos, materiais ferruginosos e conglomerados.

2535



De acordo com Tancredi (1996), a sequência litológica da Formação Alter do Chão é composta por argilitos, siltitos, conglomerados subordinados e níveis de lateritas. Essas rochas são formadas a partir do acúmulo e compactação de sedimentos em ambientes fluviais ou lacustres. Os arenitos são formados pela junção de grãos de areia, finos a médios, geralmente apresentando estratificação cruzada e coloração avermelhada. Os argilitos apresentam variedade de cores, como vermelho, creme, branco e roxo. Os conglomerados contêm seixos de quartzo claro e quartzo leitoso.

Outra unidade presente na região é a Cobertura Detrito-Laterítica Paleogênica, que ocorre em áreas denominadas chapadões. Essa unidade tem como principal característica exibir um perfil laterítico completo, pois apresenta um tipo de solo endurecido e rico em ferro (Costa et al., 1985). Da base para o topo, ocorrem horizontes argilosos e mosqueados, culminando em uma espessa crosta laterítica ferruginosa. Essa cobertura é composta por sedimentos argilo-arenosos, de cor amarelada, depositados em períodos mais antigos, caulinitizados, parcial a totalmente pedogenizados.

As composições geológicas exercem influência direta no processo hidrológico da sub-bacia do rio Jauruçu. As unidades Alter do Chão e Paleogênicas, por serem predominantemente arenosas, favorecem a infiltração da água no solo devido à sua alta permeabilidade. No caso das formações lateríticas, a permeabilidade pode variar significativamente dependendo do grau de intemperismo e consolidação. Lepsch (2010) sustenta que os solos lateríticos podem apresentar alta porosidade em estágios iniciais de formação, o que aumenta a sua permeabilidade. No entanto, de acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018), nos estágios avançados de laterização, a formação de uma crosta endurecida e bem consolidada reduz significativamente a permeabilidade. Esse processo é comum em regiões onde a laterização ocorreu durante o período Cenozóico, como observado por Costa et al. (2003). Nessas áreas, a crosta laterítica endurecida pode intensificar o fluxo superficial e contribuir para processos erosivos. De acordo com o Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA, 2020), a durabilidade e a espessura da crosta laterítica são fatores determinantes para a redução da permeabilidade e o aumento da erosão superficial.

4.4 Geomorfologia

O estado do Pará possui paisagens geomorfológicas bem caracterizadas, como planícies de inundação e terraços fluviais das várzeas amazônicas, tabuleiros e baixos platôs modelados em rochas sedimentares pouco litificadas, além de superfícies de aplainamento nas áreas cratônicas, planaltos e serras modelados em coberturas plataformais ou litologias mais resistentes à erosão (Dantas et al., 2014). Os autores apontam ainda que esses ambientes estão sujeitos aos efeitos dos tipos de clima existentes na região Amazônica (quente e úmido), o que provoca intensos processos de intemperismo químico e lixiviação dos solos, resultando em uma paisagem composta principalmente por formações florestais.

Nesse sentido, Ross (1985) aponta que grande parte da evolução geomorfológica do estado do Pará está inserida na Depressão Amazônica e que essas características determinam os domínios e unidades presentes na área de estudo.

Na FIGURA 6, podemos identificar os domínios dos Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental, representados por extensas superfícies tabulares revestidas por matas de terras firmes, com relevo mais aplainado e altitudes moderadas. Esses domínios estão presentes na parte central do estado e estão geralmente associados aos solos lateríticos e ao intenso processo de intemperismo. Segundo Ab'Sáber (2003), os Platôs Amazônicos formaram-se a partir de ciclos de erosão e sedimentação que remontam ao período Cenozóico.



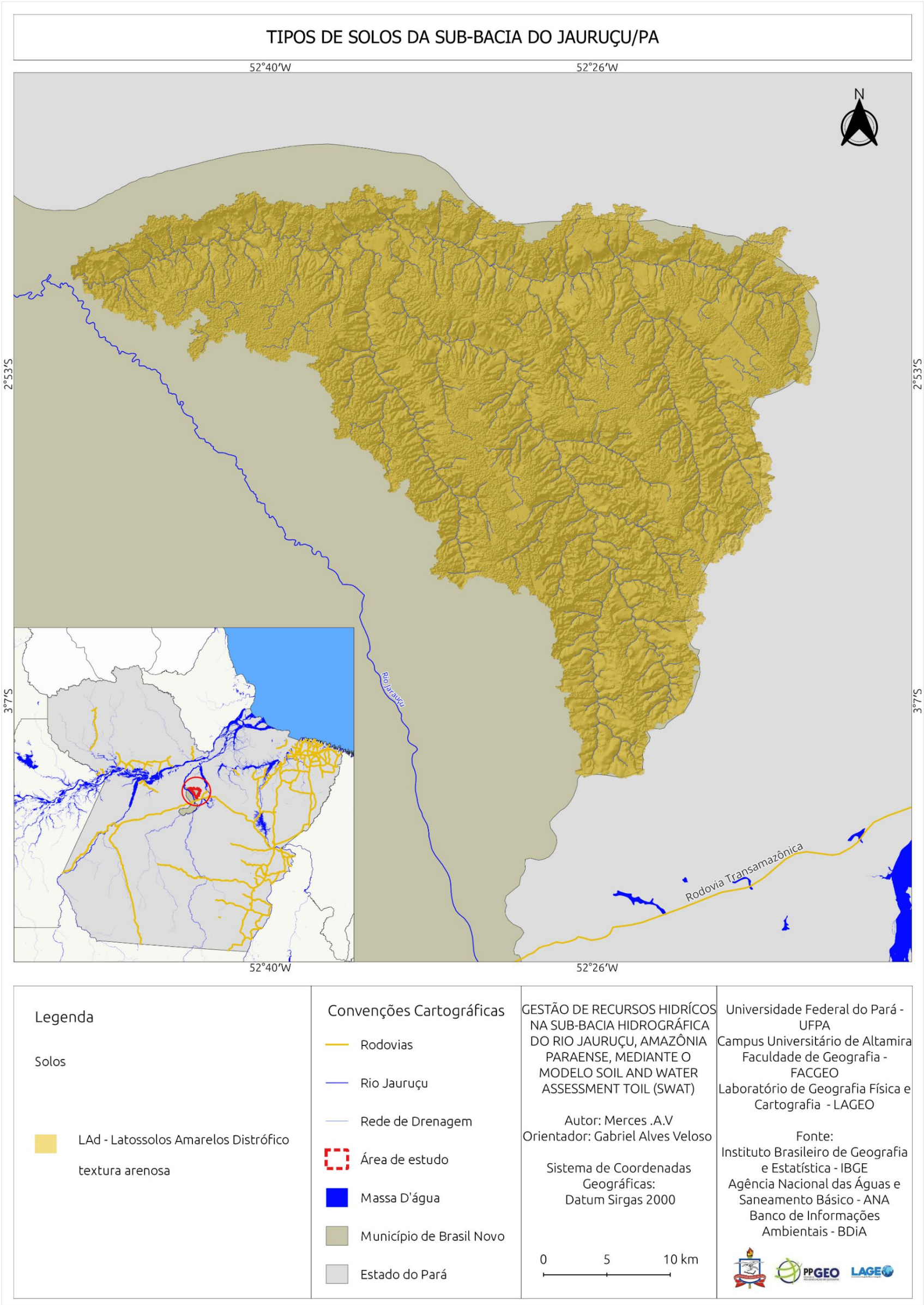
As curiosas formas dos baixos platôs sugerem influência neotectônica, considerando as configurações morfológicas dos baixos cursos dos rios Xingu e Tapajós. Barbosa et al. (1974) sustentam que ambos os rios são constituídos por grandes rias fluviais enquanto atravessam os baixos platôs em direção ao rio Amazonas, apresentando reborbos erosivos com mais de 50 m de desnível no rio Tapajós, características que o autor designa como 'falésias fluviais'. Outra característica geomorfológica dessa região é o Planalto do Tapajós-Xingu.

Essa unidade é caracterizada por relevos mais elevados e pela presença de solos mais profundos, com predominância de processos erosivos e deposicionais. Costa et al. (2003) consideram que os Planaltos do Tapajós-Xingu apresentam interações entre períodos distintos, como entre as rochas pré-cambrianas e as coberturas sedimentares mais recentes.

4.4.1 Tipos de Solos

A sub-bacia do Rio Jauruçu é predominantemente composta por Latossolo Amarelo Distrófico (LAD), de textura arenosa, conforme ilustrado na FIGURA 7. De acordo com Chauvel (1981), o LAD é caracterizado por sua elevada argilosidade, e sua formação e evolução são diretamente influenciadas pelo clima úmido e pela densa cobertura vegetal equatorial, típica da região amazônica. Essas condições climáticas e bióticas favorecem processos intensos de intemperismo químico, responsáveis pela transformação e maturação desses solos.

Figura 7: Mapa dos Tipos de Solos da Sub-Bacia do Rio Jauruçu.

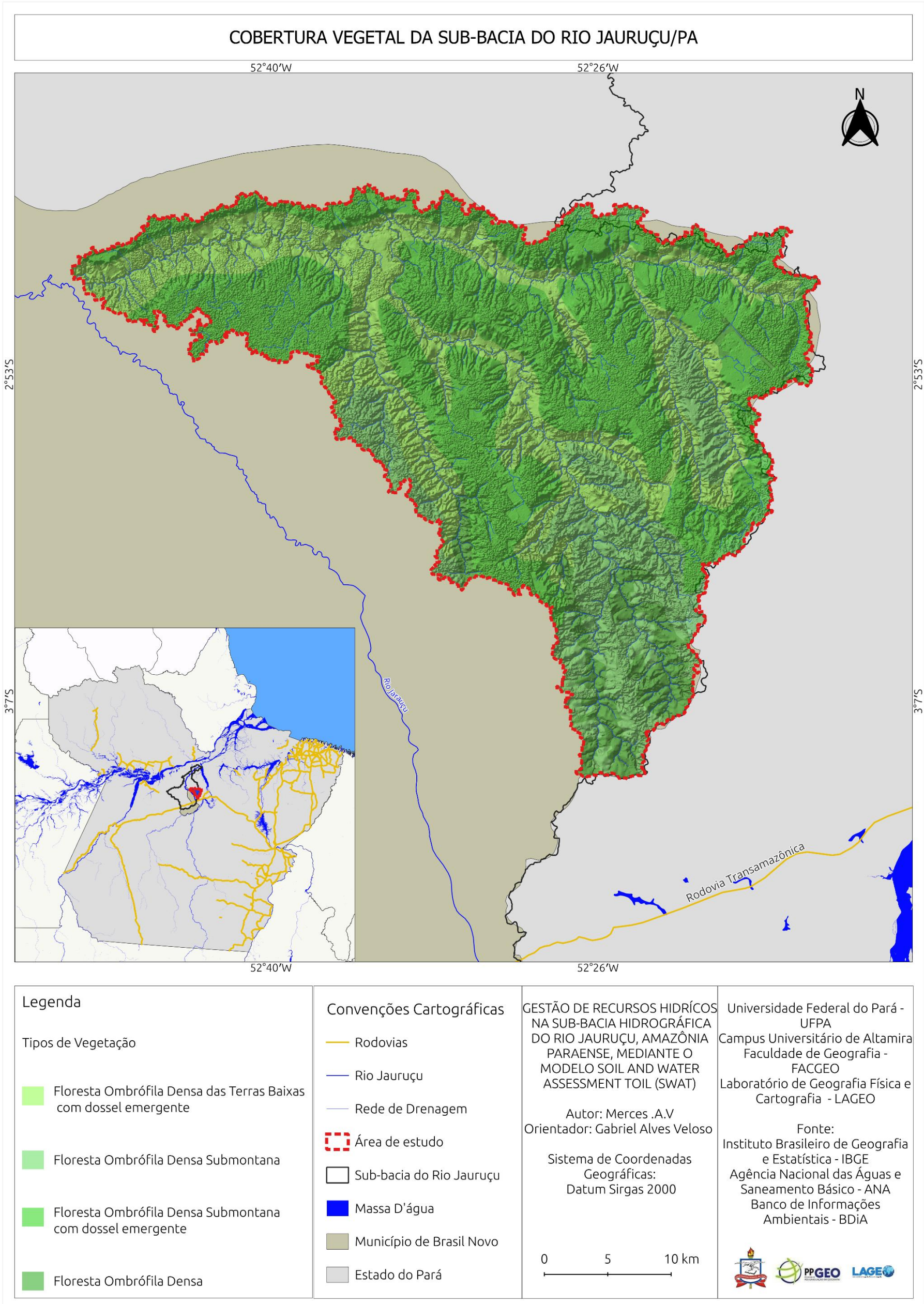


Alvarez (2022) destaca que a gênese do Latossolo Amarelo Distrófico na sub-bacia está intimamente relacionada às variações climáticas da região Amazônica, nas quais as alternâncias entre períodos de seca e umidade promovem a erosão e a lixiviação dos solos com maior teor de areia. Esse processo contínuo de remoção de partículas finas e redistribuição de materiais ao longo do tempo resulta na formação de solos profundos, porosos e de baixa fertilidade natural, características marcantes do Latossolo Amarelo Distrófico encontrado na área de estudo.

4.4.2 Tipos de Vegetação

A FIGURA 8 apresenta o mapa dos tipos de vegetação presentes na sub-bacia do Rio Jauruçu. A Floresta Ombrófila Densa (FOD) predomina em toda a sub-bacia, diferenciando-se apenas pelos seus tipos. Essa vegetação, conhecida como Floresta Pluvial, caracteriza-se por apresentar folhas largas e perenes, com ciclo de vida longo (Snif, 2020).

Figura 8: Mapa dos tipos de vegetação presentes na sub-bacia do Rio Jauruçu.

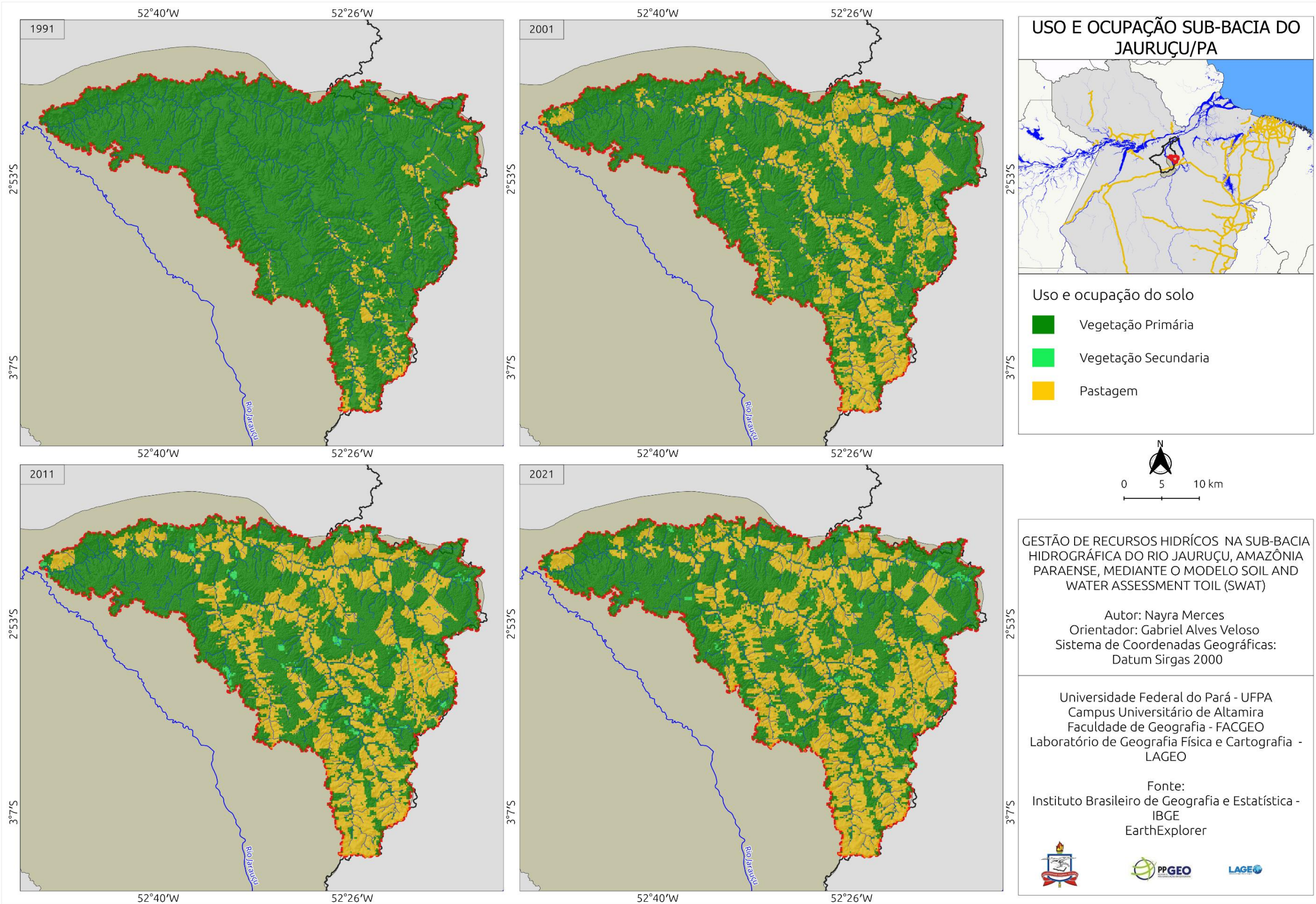


Esse tipo de floresta é caracterizado por uma elevada diversidade de espécies vegetais e animais, sendo considerado um dos ecossistemas mais complexos e biologicamente ricos do planeta. A presença de árvores emergentes, que se elevam acima do dossel principal, é uma característica marcante em alguns subtipos de florestas ombrófilas densas, como a Floresta Ombrófila Densa Submontana com Dossel Emergente. Essas árvores emergentes desempenham um papel essencial na estrutura da floresta, criando microclimas que favorecem a diversidade de espécies no sub-bosque, além de contribuírem para a dispersão de sementes e a manutenção da conectividade ecológica (IBGE, 2012; Oliveira-Filho, 2009).

4.4.3 Uso e Ocupação do Solo

A FIGURA 9 apresenta o mapa de uso e ocupação da sub-bacia do Rio Jauruçu para os anos de 1991, 2001, 2011 e 2021. Para melhor compreensão da dinâmica e alterações da região, optou-se por apresentar as formas de uso do solo em intervalos de 10 anos. Observa-se uma intensa transformação na área de estudo, destacando-se, sobretudo, a redução das áreas de vegetação e o aumento das áreas de pastagem. O processo de aceleração dessas mudanças intensificou-se a partir da década de 1990, impulsionado pelo maior acesso decorrente da construção da BR-230.

Figura 9: Mapas de Uso e Ocupação da sub-bacia do Rio Jaurucu-PA para os anos 1991, 2001, 2011 e 2021.



Fonte: Elabora pela autora.

No cenário inicial (1991), a região ainda estava em processo de consolidação de sua ocupação, e os impactos ambientais decorrentes da mudança no uso do solo não eram tão expressivos. De acordo com dados do Projeto de Monitoramento Anual de Uso e Cobertura da Terra (MAPBIOMAS), nesse mesmo ano, o Estado do Pará mantinha aproximadamente 86% de sua cobertura florestal preservada, com as áreas de maior degradação concentradas na região noroeste, especialmente próximas à divisa com o Estado do Maranhão.

No entanto, ao analisar o cenário mais recente (2021), observa-se um avanço significativo da pecuária extensiva, principalmente sobre áreas de vegetação primária. Essa prática consolidou-se como um dos principais vetores de desmatamento na região, provocando mudanças drásticas na sub-bacia ao longo das três décadas estudadas. A predominância da pastagem como atividade antrópica, voltada ao aproveitamento econômico, resultou em alterações na funcionalidade da paisagem, incluindo a perda do potencial ecológico, a degradação do solo, a formação de voçorocas e o assoreamento dos rios, entre outros impactos. A presença de voçorocas e o assoreamento dos rios na sub-bacia estudada podem ser observados na FIGURA 10.

Figura 10: Formação de voçoroca e drenagem assoreada.



Fonte: Trabalho de campo.

Na imagem em questão, é possível observar uma notável degradação do solo na sub-bacia, marcada pela presença de uma das voçorocas existentes na sub-bacia. Esse processo erosivo tem se intensificado ao longo do tempo e apresenta uma tendência de expansão contínua. A situação é agravada pela lixiviação do solo, um fenômeno que se torna mais severo devido à conversão de áreas naturais em pastagens para a criação de gado.

A remoção da cobertura vegetal original deixa o solo desprotegido, aumentando sua vulnerabilidade à ação das chuvas, o que facilita a erosão e a formação de voçorocas. Esse ciclo de degradação não apenas reduz a fertilidade do solo e sua capacidade de sustentar a vegetação, mas também contribui para o assoreamento de rios e córregos, exacerbando os impactos ambientais na região.

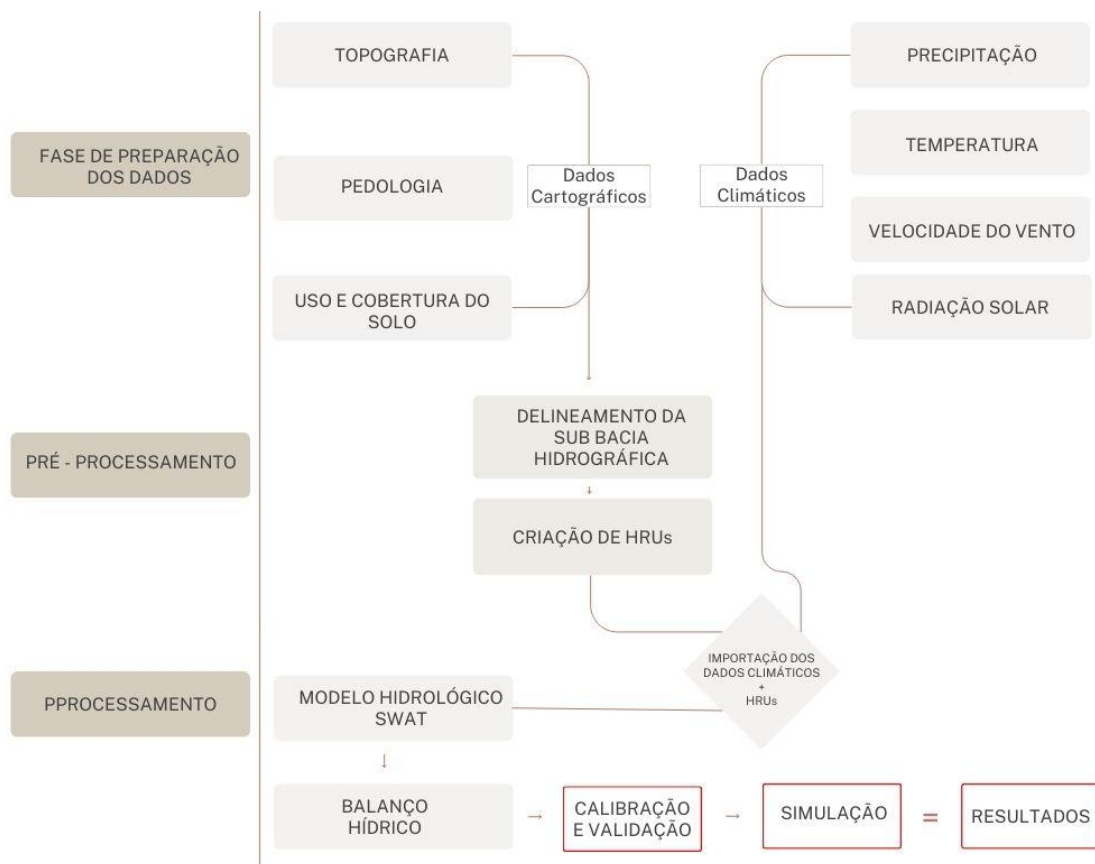
4.5 Procedimentos operacionais da Modelagem no SWAT

O modelo SWAT requer um grande volume de informações para a realização da modelagem hidrológica. Embora possua bancos de dados padronizados para variáveis de entrada em escalas global e continental, esses dados nem sempre representam adequadamente a área de estudo. Por essa razão, foram utilizadas informações locais disponibilizadas em bases públicas.

O modelo exige essencialmente três tipos de dados: físicos, tabulares e estatísticos, conforme descrito a seguir:

- **Dados espaciais:** inseridos em formato raster, englobam o modelo digital de elevação, o uso e a ocupação do solo, além da classificação dos tipos de solo;
- **Dados tabulares:** incluem séries históricas diárias de dados meteorológicos e de precipitação, além de tabelas associativas que vinculam informações aos dados espaciais;
- **Dados estatísticos:** correspondem às variáveis meteorológicas diárias pré-processadas em planilhas *Macro WGEN*.

Figura 11: Organograma das fases de processamento do modelo SWAT.



Fonte: Elaborado pela autora.

Este trabalho está estruturado em três etapas principais para a realização das análises: a fase de preparação dos dados, a fase de pré-processamento e a fase de processamento.

Na primeira etapa, referente aos dados físicos, foi necessário coletar e organizar as informações requeridas pelo modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes softwares: QGIS versão 3.34.11 e Excel. O desenvolvimento da modelagem a partir do SWAT está representado na Figura 12, que apresenta as etapas executadas e as informações necessárias para a simulação.

4.5.1 Dados Espaciais

Os dados espaciais possuem dimensão e projeção cartográfica, representando as camadas matriciais do Modelo Digital de Elevação (MDE), os tipos de solo e o uso e a ocupação do solo. Após serem inseridos no projeto por meio do QSWAT+, esses dados são cruzados e processados para gerar informações físicas detalhadas da área de estudo.

É importante destacar que o QSWAT+ exige que todos os dados espaciais compartilhem as mesmas propriedades, como sistema de coordenadas e resolução, para garantir a consistência e precisão dos resultados. Para isso, foram utilizados dados georreferenciados de topografia, obtidos a partir do Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model, que apresenta uma resolução espacial de 30 metros.

A importância desses dados altimétricos é fundamental para a pesquisa, uma vez que o Modelo Digital de Elevação (DEM) permite identificar a direção dos fluxos de água, sendo essencial para a delimitação das bacias, sub-bacias e microbacias na área de estudo. Além disso, o DEM é crucial para a caracterização do relevo e para a compreensão dos processos hidrológicos na região.

4.5.2 *Dados Pedológicos*

Para a obtenção dos dados de solo, optou-se por uma abordagem generalizada, utilizando como fonte principal o BDIA (2023). A partir desses dados, foi realizado o recorte espacial da área de estudo e a classificação dos solos, adaptando-os às necessidades do projeto. Essa etapa foi essencial para garantir que as informações sobre os tipos de solo estivessem alinhadas com as características específicas da região, permitindo uma representação mais precisa e consistente no modelo.

A partir disso, os dados pedológicos foram organizados em uma planilha desenvolvida por Saxton e Rawls (2006), a qual contém dados de granulometria, carbono orgânico, número e profundidade dos horizontes do solo, além de 12 parâmetros fundamentais, conhecidos como função de pedotransferência, apresentados na Tabela 1.

Os autores Saxton e Rawls (2006) desenvolveram essa planilha baseada em um método conhecido como “função de pedotransferência”, que permite estimar, a partir de dados de granulometria, teor de carbono orgânico, número e profundidade

dos horizontes do solo, os 12 parâmetros essenciais para o modelo SWAT. Esses parâmetros são fundamentais para a caracterização hidrológica dos solos, contribuindo para a precisão das simulações realizadas pelo modelo.

Tabela 1: Parâmetros de entrada de características físico-químicas do solo da Sub-Bacia do Rio Jauruçu para o SWAT.

Parâmetros	Latossolo
SOL_ZMX	1850000
ANION_EXCL	5000
SOL_CRK	5000
TEXTURE	SCL
SOL_Z	250000
SOL_BD	12555
SOL_AWC	885
SOL_K	521434
SOL_CBN	72000
SOL_ALB	42
USLE_K	692
SOL_EC	10000

Fonte: Elaborado pela Autora, a partir do SWAT Documentations (2019).

É importante destacar que, para que todas essas informações possam ser utilizadas pelo modelo, é necessário que estejam reprojetadas para o Datum SIRGAS 2000 e na projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator). No caso da área de estudo, ela está localizada na Zona 22 Sul.

Esse processo de reprojeção garante a compatibilidade e a precisão dos dados espaciais, aspectos essenciais para a modelagem hidrológica.

4.5.3 Dados de Uso e Ocupação do Solo

Para realizar uma análise temporal abrangendo 30 anos, foram selecionados 2 anos distintos de uso do solo (1991 e 2021) visando avaliar as respostas hidrológicas em cada um desses períodos.

Inicialmente, foram obtidas imagens do Satélite LANDSAT 5, sensor TM, referentes às datas 20/07/1991. Para o ano de 2021, foram utilizadas imagens do Satélite LANDSAT 8, sensores OLI e TIRS, captadas em 07/08/2021.

Após a aquisição das imagens, foi realizado o recorte da área e a classificação por segmentação, utilizando o Software QGIS versão 3.34.11 e a ferramenta Órfeo Toolbox (OTB). A classificação foi dividida em três categorias: Vegetação Primária, Vegetação Secundária e Pastagem.

As três classes de uso do solo adotadas foram definidas com base na predominância das categorias e na escala de trabalho de 1:50.000. Nesse contexto, a classe denominada "Pastagem" pode englobar outras atividades, como a agricultura familiar, que, no entanto, é de difícil distinção em imagens Landsat. Diante da hegemonia da pecuária extensiva, consolidada como a principal atividade econômica da região ao longo dos anos, optou-se por utilizar exclusivamente a classe "Pastagem".

Após a classificação segmentada, foi realizada a correção por polígonos para aprimorar os resultados. Em seguida, foi calculada a área das classes de uso do solo utilizando a ferramenta Calculate Geometry. Na classificação baseada na segmentação de imagens, os grupos de pixels adjacentes são segmentados conforme suas características, incluindo tamanho, homogeneidade espectral, homogeneidade espacial e forma do objeto (LUZ, ANTUNES e JUNIOR, 2009; MENESES e ALMEIDA, 2012; WHITESIDE e AHMAD, 2005).

4.5.4 Dados Tabulares e Estatísticos

Nesta fase da pesquisa, identificou-se uma dificuldade significativa na obtenção de dados pluviométricos diretamente na sub-bacia estudada, uma vez que, não há sistemas de monitoramento instalados na área. Diante disso, optou-se por utilizar dados das estações pluviométricas mais próximas à área de estudo, que possuem séries históricas mais abrangentes, com registros a partir de 1990.

O mesmo procedimento foi adotado para os demais dados estatísticos climáticos, que foram coletados da estação meteorológica localizada na cidade de Altamira (COD: 82353, Latitude: -3.21416666, Longitude: -52.21305555), sendo essa a mais próxima da área de estudo.

Diante disso, os parâmetros estatísticos requeridos pelo gerador climático na planilha Macro WGEN estão apresentados na Tabela.

Tabela 2: Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da Estação Meteorológica de Altamira.

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	31.45	30.87	30.94	31.05	31.40	31.84	32.20	33.21	33.65	33.86	33.53	32.68
TMPMN	23.61	23.52	23.75	23.85	23.95	23.79	23.57	23.97	24.13	24.27	24.38	24.06
TMPSTDM X	1.55	1.58	1.46	1.39	1.30	1.19	1.05	0.89	0.84	1.00	1.26	1.52
TMPSTDM N	1.01	0.99	0.94	0.87	0.89	0.92	0.96	0.99	0.90	0.96	1.01	0.96
PCPMM	224,91	281,20	336,05	391,62	322,24	245,70	139,05	79,72	57,70	47,35	61,88	118,10
PCPSTD	14.18	14.47	15.89	16.95	13.33	12.03	9.29	5.96	5.69	5.46	7.41	8.66
PCPSKW	5.20	3.31	3.35	2.49	2.16	2.31	2.92	3.36	6.53	6.24	6.10	3.76
PR_W1	0,54	0,75	0,76	0,77	0,73	0,54	0,44	0,34	0,27	0,22	0,19	0,35
PR_W2	0,75	0,86	0,85	0,89	0,85	0,75	0,64	0,47	0,42	0,37	0,44	0,63
PCPD	21.16	23.52	25.84	26.19	25.97	20.58	15.52	0,64	9.74	7.68	7.61	14.52
SOLARAV	15.7	12.3	8.2	7.1	4.2	3.4	-5.2	7.9	12.6	13.0	17.5	17.7
WNDV	0.65	0.67	0.66	0.63	0.64	0.65	0.61	0.73	0.75	0.76	0.74	0.74
DEWPT	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,6	0,7	0,8

Fonte: INMET (2023), organizado pela Autora.

TMPMX: Temperatura máxima (°C);

TMPMN: Temperatura mínima (°C);

TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C);

TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C);

PCPMM: Precipitação média (mm);

PCPSTD: Desvio padrão da precipitação (mm);

PR_W1: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%);

PR_W2: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%);

PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima;

PCPD: Número de dias de precipitação (dias);

RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm);

SOLARAV: Radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹);

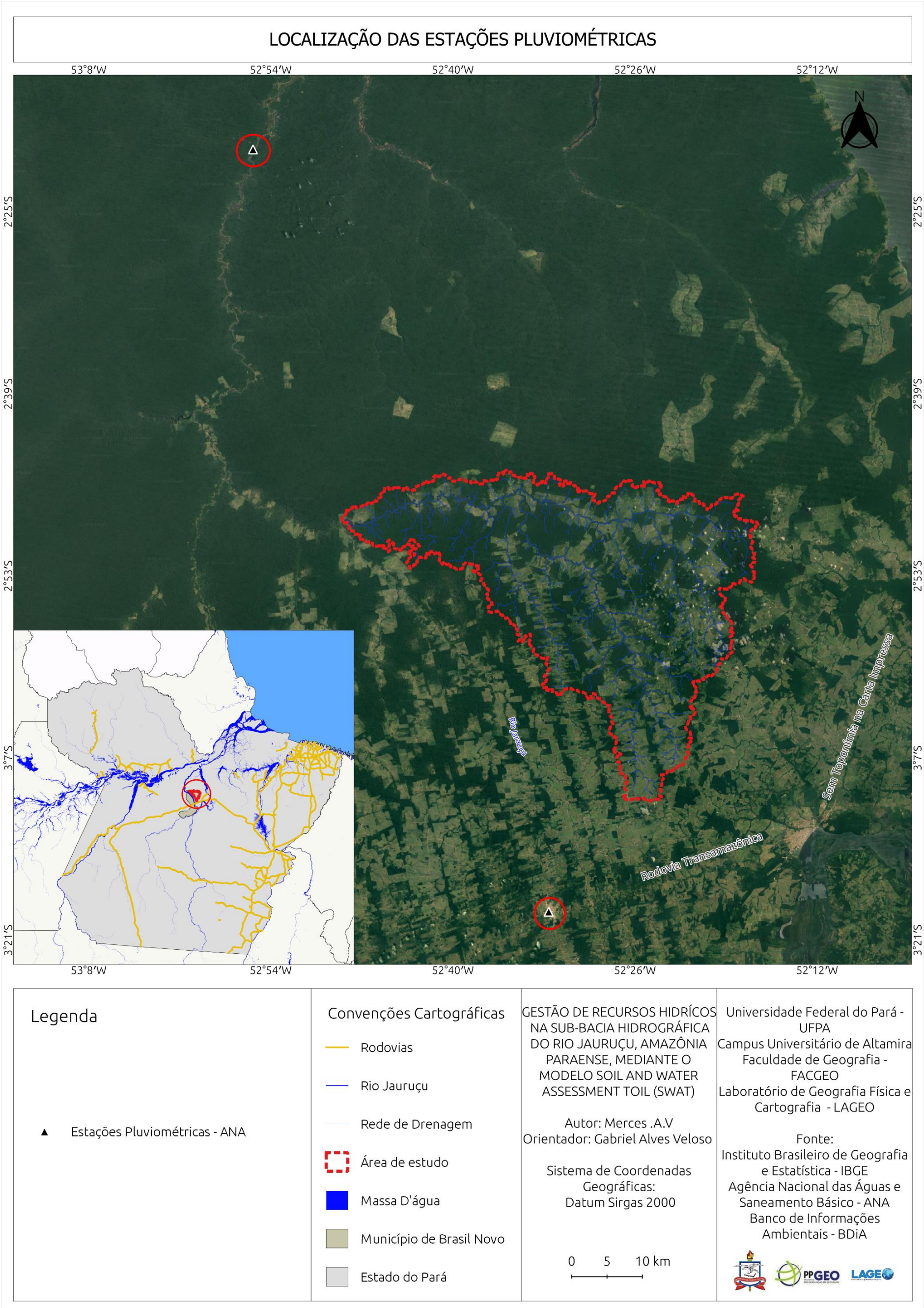
DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho (°C); e

WNDV: Velocidade do vento (m s⁻¹).

A FIGURA 12 ilustra o mapa de localização das duas estações pluviométricas disponíveis na região, uma com COD: 352.005 e a outra com COD: 252.001, conforme dados fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Essa abordagem permitiu contornar a ausência de dados locais, garantindo a representatividade das condições climáticas da sub-bacia e viabilizando a execução das simulações hidrológicas no modelo SWAT.

Figura 12: Mapa de localização das estações da ANA.



4.5.4 Pré- Processamento

Após a organização do banco de dados, passou-se para a segunda etapa: o pré-processamento. A partir da integração de diferentes camadas de informações espaciais inseridas no modelo, com base no DEM, foram obtidas as delimitações das sub-bacias e microbacias, bem como a rede de canais fluviais (Arnold et al., 2012; Neitsch et al., 2011), resultando na definição de 43 sub-bacias.

Diante disso, as Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) foram formadas pela sobreposição dos mapas de uso do solo, mapas de solos e definição da declividade, com base na determinação automática de áreas homogêneas. Essas informações são fundamentais para compreender a dinâmica hidrológica da área de estudo.

Posteriormente, as HRUs foram estruturadas pela sobreposição dos mapas de uso do solo, mapas de solo e definição das classes de declividade (Winchell et al., 2013). Esse processo é realizado automaticamente pelo modelo, que identifica áreas homogêneas com base nas semelhanças desses três fatores. Por exemplo, uma HRU pode representar uma área com um tipo específico de solo, coberta por uma determinada classe de uso do solo (como agricultura ou floresta) e com uma faixa de declividade particular.

A importância das HRUs torna-se crítica no modelo SWAT+, pois permite a representação detalhada da variabilidade espacial dentro de uma bacia hidrográfica. Isso possibilita uma simulação mais precisa dos processos hidrológicos, como infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração, que são diretamente influenciados pelas características do solo, uso do solo e topografia (Gassman et al., 2007). Dessa forma, a delimitação das HRUs a partir do DEM e da integração dos mapas temáticos é essencial para garantir a acurácia e a confiabilidade dos resultados do modelo.

Na terceira e última etapa deste trabalho, o processamento foi realizado por meio da junção dos dados geofísicos com os dados climáticos, devidamente organizados no SWAT Editor 2023. Assim, nesta etapa, o modelo processou os dados referentes ao período de 01/01/1991, sendo que foi necessário 1 ano para aquecimento do modelo, e 31/12/2021.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do modelo SWAT+, destaca-se que ele utiliza uma série de fórmulas matemáticas e equações hidrológicas que definem todo o processo de simulação. Essas fórmulas são aplicadas para representar os diferentes componentes do ciclo hidrológico, desde a precipitação até o escoamento nos rios.

De acordo com Malluta (2012), as simulações hidrológicas realizadas pelo SWAT podem ser divididas em duas fases principais:

Fase terrestre: Representa os processos que ocorrem na superfície e no solo, como infiltração, evapotranspiração e geração de escoamento superficial.

Fase de propagação do ciclo hidrológico: Refere-se ao transporte da água e dos sedimentos ao longo da rede de drenagem.

5 Procedimentos e Etapas Metodológicas

Diante da proposta de realizar uma análise do balanço hídrico utilizando o SWAT, nesse capítulo será abordado todos os procedimentos e etapas metodológicas realizados, bem como o material necessário para a execução desse trabalho. Em relação aos dados de imagens de satélite, as escolhas das datas ocorreu devido à obtenção das melhores imagens, contendo menor teor de nuvens. Diante da proposta de realizar uma análise do balanço hídrico utilizando o SWAT, este capítulo abordará todos os procedimentos e etapas metodológicas realizadas, bem como o material necessário para a execução do trabalho.

Em relação aos dados de imagens de satélite, a escolha das datas ocorreu com base na obtenção das melhores imagens, priorizando aquelas com menor teor de nuvens.

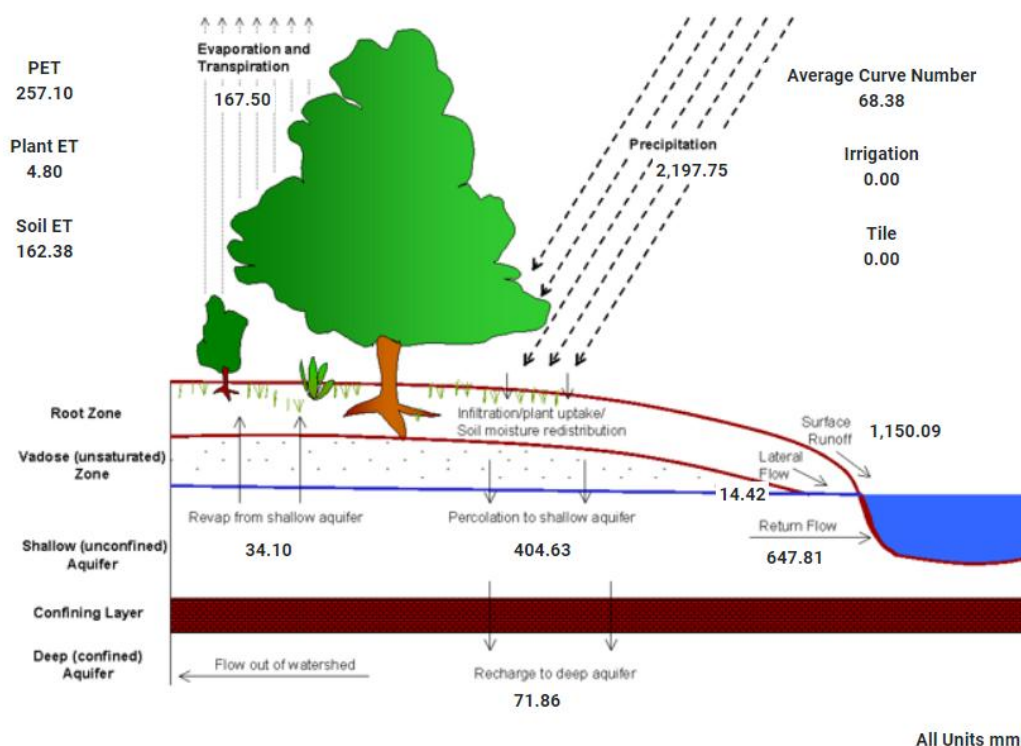
5.1 Fase Inicial do Ciclo Hidrológico

A fase terrestre do ciclo hidrológico no modelo SWAT+ é dividida em sete componentes principais, que podem ser simulados de acordo com as necessidades do usuário e as características da bacia hidrográfica em estudo. Esses componentes são flexíveis, permitindo que o usuário escolha quais processos deseja incluir na simulação, dependendo dos objetivos do projeto e da disponibilidade de dados.

A FIGURA 13 apresenta a simulação completa do ciclo hidrológico realizada pelo modelo SWAT+. Essas informações foram geradas utilizando os dados de uso do solo referentes ao ano de 1992.

A seguir, são apresentados os sete componentes da fase terrestre:

Figura 13: Ciclo Hidrológico simulado pelo modelo SWAT+.



Fonte: SWAT+,2023, organizado pela autora

O ciclo hidrológico utilizado nas simulações do SWAT é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 \sum_{i=1}^T (P_d - Q_{sup} - E_a - w_{vad} - Q_{sub})$$

Onde:

SW_t ; quantidade de água no solo no fim do dia (mm);

SW_0 ; quantidade de água no início do dia (mm);

T ; tempo (dias);

Pd; precipitação no dia (mm);

Qsup; representa o escoamento superficial (mm);

Ea; quantidade de água que evapotranspirou no dia (mm);

Wvad; quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm); e

Qsub; quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

Nesse processo, as HRUs permitem que o cálculo dos processos hidrológicos, como a evapotranspiração (ET), seja realizado de forma diferenciada para cada combinação de uso e cobertura do solo, tipo de solo e declividade. Esse método aumenta a precisão das simulações, uma vez que cada HRU representa uma área homogênea em termos dessas características.

No caso específico deste estudo, as HRUs caracterizam uma única combinação de uso e cobertura vegetal, tipo de solo e faixa de declividade. Essa segmentação permite que o modelo estime o escoamento superficial de maneira individualizada para cada HRU, levando em consideração as particularidades de cada área. Como resultado, a descrição do balanço hídrico da bacia hidrográfica torna-se mais precisa e detalhada, refletindo melhor a variabilidade espacial dos processos hidrológicos.

5.1.2 Escoamento Superficial

O escoamento superficial é calculado com base nos valores de precipitação e no método do Número de Curva (CN), uma abordagem empírica desenvolvida pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (USDA-SCS). Esse método foi criado com o objetivo de estimar o escoamento superficial em diferentes cenários de uso do solo, cobertura vegetal e tipos de solo.

O método CN é amplamente utilizado em modelos hidrológicos devido à sua eficácia na previsão do escoamento. A equação básica do método CN é dada por:

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - I_a)^2}{(P_i - I_a + S)}$$

Onde:

Qsurf; escoamento superficial total (mm);

Pi; precipitação total (mm);

Ia ;abstração inicial (o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo

antes de iniciar o escoamento superficial em mm); e
S; parâmetro de retenção (mm) o qual varia com o uso.

5.1.2 Vazão de Pico

O modelo SWAT utiliza o Método Racional Modificado para calcular a vazão de pico, conforme descrito por Neitsch et al. (2002). Esse método é amplamente empregado em hidrologia para estimar a vazão máxima gerada em uma bacia hidrográfica durante um evento de precipitação. A equação utilizada para o cálculo da vazão de pico é a seguinte:

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{sc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}}$$

Onde:

Qpico; vazão de pico (m3/s);

Atc; fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração;

Qsup; escoamento superficial (mm);

A; área da sub-bacia (km²); e

Tcon; tempo de concentração (h).

5.1.3 Tempo de Precipitação

O tempo de concentração é definido como o intervalo de tempo que é levado para que a água precipitada no ponto mais distante de uma bacia hidrográfica percorra até o seu exutório. Esse fator é muito importante para o entendimento da dinâmica hidrológica de uma bacia, pois influencia diretamente a resposta hidrológica a eventos de chuva, incluindo o tempo de chegada e a magnitude da vazão de pico. Sua equação é a seguinte:

$$t_{conc} = t_{cs} + t_{cc}$$

Onde:

Tconc; tempo de concentração na bacia (horas);

Tcs; tempo de concentração do escoamento terrestre (horas); e

Tcc; o tempo de concentração do escoamento no canal (horas).

5.1.4 Escoamento Lateral

O escoamento lateral é um processo hidrológico que ocorre de maneira significativa em solos que possuem uma camada superficial com alta condutividade hidráulica, seguida de uma camada semi-impermeável ou impermeável. Nessas condições, a água que infiltra no solo não consegue percolar verticalmente de forma eficiente devido à barreira imposta pela camada inferior, sendo direcionada horizontalmente como escoamento lateral. Esse fenômeno é comum em solos com horizontes impermeáveis ou em áreas com alta saturação do solo.

Para analisar esse processo, o modelo SWAT incorpora um tipo de armazenamento cinemático para simular o escoamento subsuperficial, desenvolvido originalmente por Sloan et al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Esse modelo é baseado na equação do balanço de massa (ou balanço de massa líquida), onde um segmento do solo em declive é utilizado como volume de controle.

Na equação apresentada, a abordagem cinemática simplifica a dinâmica do fluxo de água no solo, considerando que o movimento da água é influenciado pela gravidade e pela declividade do terreno.

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly} \cdot excess \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right)$$

Onde:

Qlat; quantidade de água que escoar subsuperficialmente (mm);

SW_{ly}; volume drenável de água na camada de solo (mm);

Ksat; condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹);

Slp; declividade média da sub-bacia (m.m⁻¹); *φ_d* é a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm⁻¹); e

L_{hill} é o comprimento do declive (m).

5.1.5 Escoamento Subterrâneo.

O escoamento de base ou subterrâneo ocorre quando a quantidade de água armazenada no aquífero ultrapassa um limiar específico definido pelo usuário. Em condições de estado estacionário, a relação entre o escoamento subterrâneo e a recarga pode ser calculada de acordo com a equação:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{(L_{gw})^2} \cdot h_{wtbl}$$

Onde:

Q_{gw} ; escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm);

K_{sat} ; condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm.dia-1);

L_{gw} ; distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m); e

H_{wtbl} ; altura do lençol freático (m).

5.1.6 Percolação

A percolação é calculado para cada camada do perfil do solo. A água poderá percolar e a umidade do solo exceder a capacidade de umidade do campo presente em cada camada individualmente, e se a camada inferior não estiver saturada. Assim, quando a camada do solo estiver congelado, nenhum fluco de água pode ser calculado. A partir disso, o volume de água disponível para que ocorra a percolação na camada é calculado a partir da equação:

$$\begin{aligned} SW_{ly, excess} &= SW_{ly} - FC_{ly} & \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \\ SW_{ly, excess} &= 0 & \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{aligned}$$

Onde:

SW_{ly} ; conteúdo de água na camada do solo (mm); e

FC_{ly} ; conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

Pode-se calcular a quantidade de água que percola para a próxima camada a partir da equação:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right)$$

Onde:

$w_{perc,ly}$; quantidade de água que percola para a próxima camada (mm);

$SW_{ly, excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm);

$t \Delta$; duração do passo de tempo (horas); e

TT_{perc} ; tempo de propagação na camada do solo (horas).

A água percola somente quando o teor de água exceder a capacidade de campo para aquela camada

O tempo total gasto para percolação é único para cada camada. Sendo calculado a partir da equação:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}}$$

Onde:

TT ; tempo de percolação (h);

SAT_{ly} ; quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado (mm); e

K_{sat} ; condutividade hidráulica saturada na camada (mm.h⁻¹).

5.1.7 Evapotranspiração

A evapotranspiração compreende todos os processos pelos quais a água da superfície terrestre é convertida em vapor, incluindo evaporação, transpiração e sublimação. É uma das principais vias de perda de água em uma bacia hidrográfica, sendo responsável por aproximadamente 62% da precipitação total devolvida à atmosfera por meio desses processos.

Thornthwaite (1948) foi quem introduziu o termo evapotranspiração potencial em sua classificação climática. Esse conceito refere-se à quantidade total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração em uma superfície extensa, coberta por vegetação e com suprimento adequado de água.

Existem diversos métodos para estimar a evapotranspiração. No modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), três métodos principais estão disponíveis para esse cálculo:

- Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989);
- Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972);
- Hargreaves (Hargreaves et al., 1985).

Neste trabalho, foi adotado o método de Penman-Monteith, cuja equação é apresentada a seguir:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^0 - e_z]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}$$

Onde:

λE ; densidade do fluxo de calor latente (MJ/m²/dia),

E ; profundidade da taxa de evaporação (mm/dia),

Δ ; inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor (kPa/°C),

H_{net} ; radiação líquida (MJ/m²/dia),

G ; a densidade de fluxo de calor para o solo (MJ/m²/dia),

ρ_{air} ; densidade do ar (kg/m³),

c_p ; calor específico (MJ/kg/°C),

e_z^0 ; pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa),

e_z ; pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa);

Γ ; constante psicrométrica (kPa/°C),

r_c ; resistência do dossel da planta, e

r_a ; resistência aerodinâmica.

5.1.7 Aporte de Sedimentos

O modelo SWAT calcula o aporte de sedimentos utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), proposta por Williams (1975). Essa equação é uma adaptação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965).

A principal diferença entre as duas equações está na substituição do fator de energia cinética da chuva (R) da USLE por um fator de escoamento, que é calculado

com base no volume escoado e na vazão de pico (Williams, 1975). Essas alterações permitem que a MUSLE seja aplicada para prever o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas de pequeno e médio porte, considerando eventos individuais de chuva e escoamento.

No modelo SWAT, a MUSLE é utilizada para avaliar o aporte de sedimentos em cada HRU dentro do modelo. Dessa forma, o SWAT é capaz de simular de maneira detalhada a produção e o transporte de sedimentos em diferentes partes da bacia hidrográfica, a partir da seguinte equação:

$$Sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Onde:

Sed; aporte de sedimentos diária (ton);

Qsurf; volume de escoamento superficial (mm H₂O ha⁻¹);

Qpea; vazão de pico (m³ s⁻¹);

Areahr; área da unidade de resposta hidrológica (HRU) (ha);

KUSL; fator erodibilidade (0,013 ton m² hr (m³ - ton cm)⁻¹);

CUSE; fator de uso e manejo do solo (adimensional);

PUSLE; fator de práticas conservacionistas (adimensional);

LSUSLE; fator topográfico (adimensional);

CFRG; fator de fragmentação esparsa (adimensional).

6 Resultados e Discussões

As simulações realizadas no SWAT+ fornecem dados que descrevem as características hidrológicas nas bacias hidrográficas, permitindo uma análise detalhada do comportamento hidrológico da área de estudo. Esses resultados podem ser obtidos em diferentes intervalos temporais, como diários, mensais ou anuais, dependendo das necessidades do projeto e da disponibilidade de dados de entrada (Gassman et al., 2007).

Os resultados da modelagem hidrológica revelam transformações significativas no balanço hídrico da Sub-Bacia do Rio Jauruçu, decorrentes das alterações no uso do solo ao longo de três décadas. Com ênfase na análise dos componentes

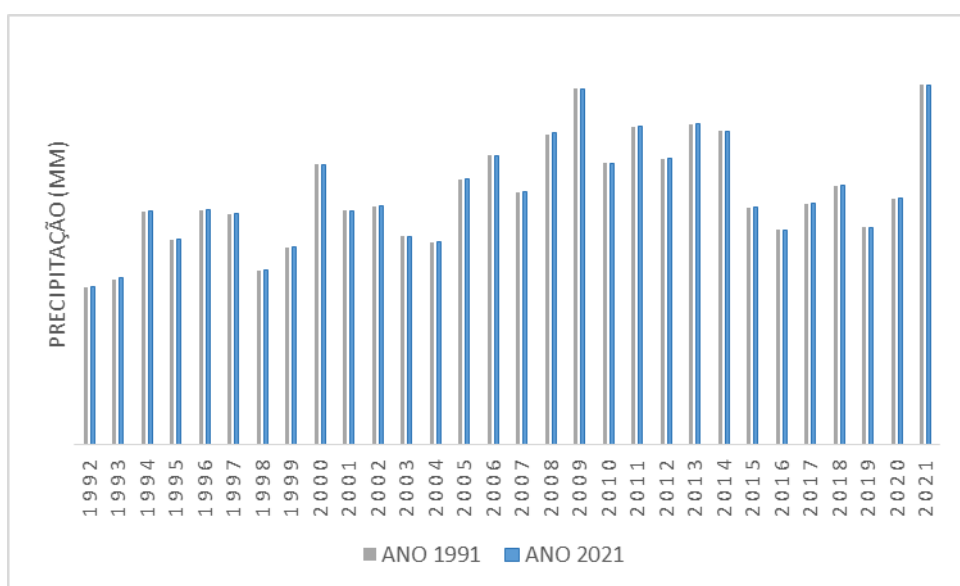
hidrológicos, os subcapítulos a seguir exploram a diminuição da precipitação, que pode estar relacionada às mudanças climáticas, o aumento do escoamento superficial, a redução da evapotranspiração e o impacto da produção de sedimentos, destacando a interligação entre práticas de manejo inadequadas e a degradação ambiental na região amazônica. Essa análise será fundamental para compreender como a dinâmica do uso do solo influencia a sustentabilidade dos recursos hídricos e as políticas de conservação pertinentes.

Ressalta-se que os resultados apresentados se referem às alterações nos dados de uso do solo, considerando uma simulação contínua de 30 anos, com um ano de aquecimento do modelo. As rodadas do modelo foram realizadas com os dados de uso do solo de 1991 e 2021, permitindo a comparação dos impactos ao longo do tempo. Nos gráficos a seguir, são apresentados os resultados da precipitação média anual da sub-bacia nos anos analisados.

6.1 Precipitação (precip):

Nos gráficos a seguir, apresenta resultados da precipitação média anual da sub-bacia referente aos anos de análise.

Figura 14: Precipitação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

Os valores de precipitação são idênticos nos dois cenários, pois a precipitação é um dado de entrada do modelo e foi utilizada de forma contínua e sem alteração.

No entanto, o aumento observado na precipitação a partir de 2004, com um pico máximo em 2009 (3.117,787 mm), pode estar relacionado a diversos fatores, entre eles, as mudanças climáticas globais. De acordo com Marengo et al. (2018), a Amazônia Ocidental tem experimentado um aumento na precipitação devido à intensificação do aquecimento global e alterações nos padrões atmosféricos, enquanto a Amazônia Oriental tem mostrado uma tendência de redução na precipitação. O mesmo autor enfatiza que essas alterações climáticas adjunto com as alterações nas formas de uso do solo, podem intensificar a erosão do solo e a produção de sedimentos na Amazônia. Essas mudanças são refletidas em variações locais, como as observadas na sub-bacia do rio Jauruçu, que apresenta variações específicas, com picos em determinados anos.

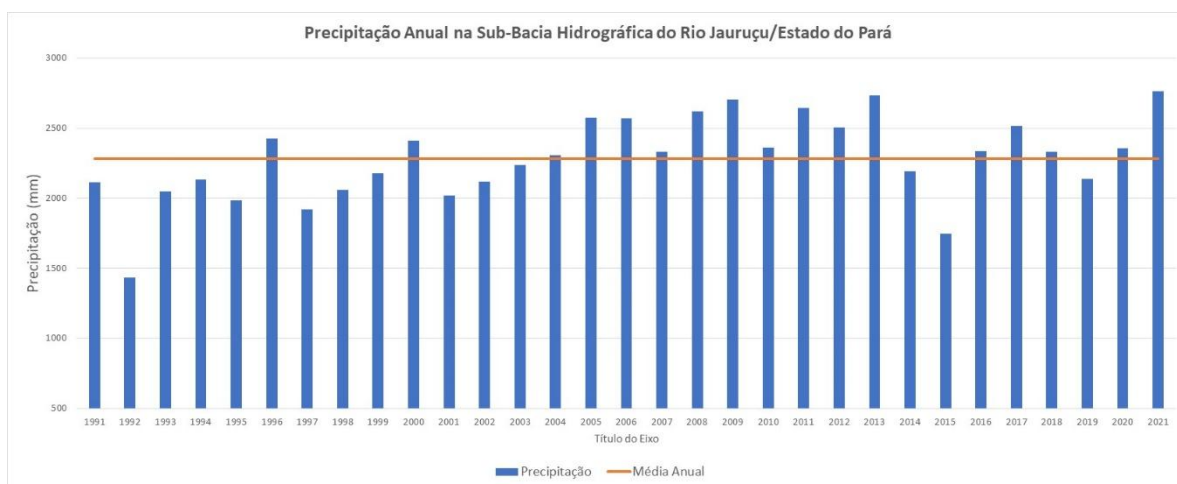
Além disso, eventos climáticos extremos, como as cheias recordes que ocorreram na Amazônia nos anos de 2012, 2014 e 2021, têm se tornado mais frequentes, o que pode estar ligado ao aumento da precipitação em períodos curtos. Mendonça et al. (2021) destacam como a intensificação de chuvas intensas em curto período tem alterado o regime hidrológico na região, exacerbando os efeitos das enchentes e alterando a dinâmica dos recursos hídricos.

A relação entre o uso do solo e o regime de precipitação também merece destaque. A alteração do uso do solo, como o desmatamento e a expansão da agricultura, pode afetar a evapotranspiração e modificar o ciclo hidrológico local, com potenciais impactos sobre a precipitação. Betts et al. (2008) indicam que o desmatamento na Amazônia pode reduzir a precipitação local, uma vez que a vegetação tem um papel fundamental na regeneração da umidade atmosférica. Em contrapartida, mudanças nas práticas de uso da terra podem ter efeitos diversos, dependendo da região e do tipo de uso do solo.

Os dados de precipitação utilizados no estudo, provenientes do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS), apresentam uma resolução espacial e temporal que permite observar as tendências de precipitação de maneira detalhada. Funk et al. (2015) ressaltam a importância desses dados para monitorar a precipitação em regiões tropicais, como a Amazônia, fornecendo uma base sólida para a análise das variações pluviométricas de longo prazo, como

mostrado no FIGURA 17. A comparação entre dados observacionais e modelados pode ajudar a validar as simulações e a entender as possíveis incertezas nos modelos utilizados.

Figura 15: Precipitação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu nos últimos 30 anos.



Fonte: elaborado pela autora, por CHIRPS.

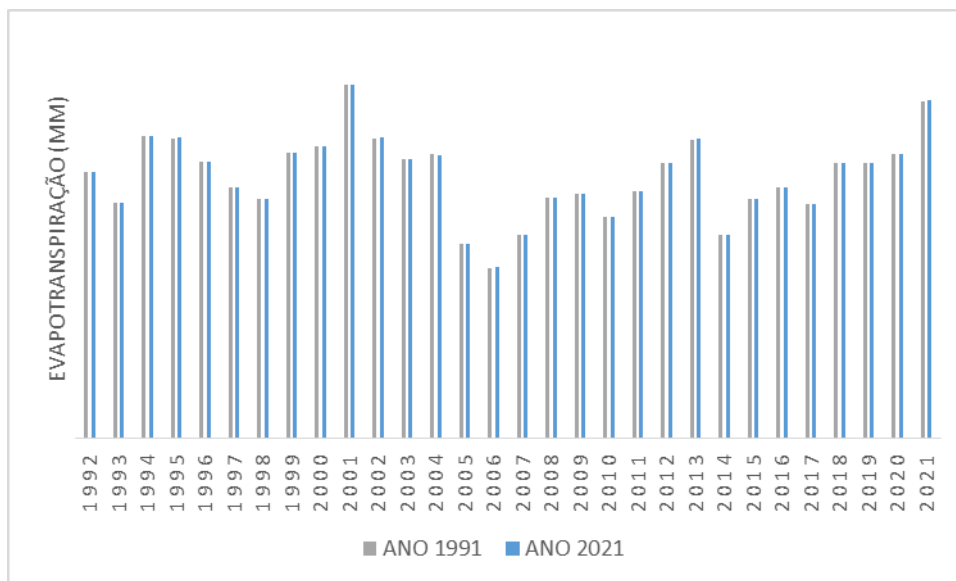
Diante disso, pode-se afirmar que a sub-bacia do rio Jauruçu, embora tenha apresentado uma tendência de aumento na precipitação ao longo do tempo, apresenta uma grande variabilidade interanual. Essa variabilidade pode estar associada, em parte, a mudanças climáticas globais, mas também reflete dinâmicas locais, como alterações no uso do solo e eventos climáticos extremos. As implicações dessas mudanças são profundas para o ecossistema amazônico, a agricultura e o manejo de recursos hídricos, exigindo estratégias adaptativas para lidar com os efeitos da variabilidade climática e dos eventos extremos.

6.2 Evapotranspiração (et)

A evapotranspiração representa a perda de água para a atmosfera por meio da evaporação e da transpiração das plantas. No modelo apresentado por Penman-Monteith, a evapotranspiração é influenciada pela disponibilidade de água, radiação solar e cobertura vegetal. No entanto, a precisão desse modelo pode ser afetada por

variáveis locais, como a umidade do solo e a densidade da vegetação, que podem não ser totalmente capturadas em modelos de escala ampla. Nos gráficos a seguir, são apresentados os resultados obtidos pelo modelo, que indicam alterações entre 1992 e 2021.

Figura 16: Evapotranspiração média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

Nos resultados de 1992, a ET média anual da sub-bacia foi de aproximadamente 601,396 mm, enquanto, em 2021, esse valor passou para 599,964 mm. Os valores de ET são praticamente idênticos, mas apresentam tendências de aumento ao longo dos anos. Contudo, essas similaridades tornam-se incoerentes, pois Allen et al. (1998) destacam que a ET está diretamente ligada aos níveis de cobertura vegetal e às mudanças climáticas. Monteith (1965) estabeleceu a base teórica para a relação entre vegetação e evapotranspiração, o que evidencia a necessidade de uma reavaliação dessa variável.

Embora o modelo SWAT seja amplamente utilizado para simulações hidrológicas, a sua capacidade de representar a evapotranspiração pode ser limitada devido à parametrização padrão de certos coeficientes. A sub-bacia do Jauruçu apresenta vegetação densa e um regime climático equatorial, fatores que podem elevar a evapotranspiração real acima dos valores modelados. Estudos como o de

Neitsch et al. (2011) sugerem que ajustes nos parâmetros de cobertura vegetal (como ALPHA_BF e CN2) podem melhorar a precisão das estimativas. Nesse caso, possivelmente o modelo não esteja captando corretamente as diferenças de transpiração entre as classes presentes na sub-bacias. Além disso, outros fatores, como o aumento da temperatura e da radiação solar, podem estar influenciando os resultados. Estudos indicam que a evapotranspiração pode ser sensível a variações na radiação solar, especialmente em climas subtropicais, onde a sazonalidade da radiação influencia significativamente os valores de ET (Jerszurki, D, et. All,.).

A precisão do modelo de evapotranspiração também pode ser influenciada pela qualidade e resolução dos dados meteorológicos utilizados. A falta de dados precisos sobre temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar pode comprometer a estimativa da evapotranspiração. Estudos demonstram que a utilização de dados de alta resolução espacial e temporal melhora a acurácia das estimativas de ET (Ruhoff, et. al,. 2013).

Em regiões semiáridas, a evapotranspiração pode ser reduzida devido à menor disponibilidade de água e à vegetação adaptada a condições de seca. No entanto, em áreas com vegetação densa, como florestas tropicais, a evapotranspiração tende a ser mais elevada devido à maior cobertura vegetal e disponibilidade de água. Estudos indicam que a evapotranspiração em florestas tropicais pode ser estimada com precisão utilizando modelos baseados na equação de Penman-Monteith, desde que sejam considerados fatores locais específicos (Ruhoff, et. al,. 2013).

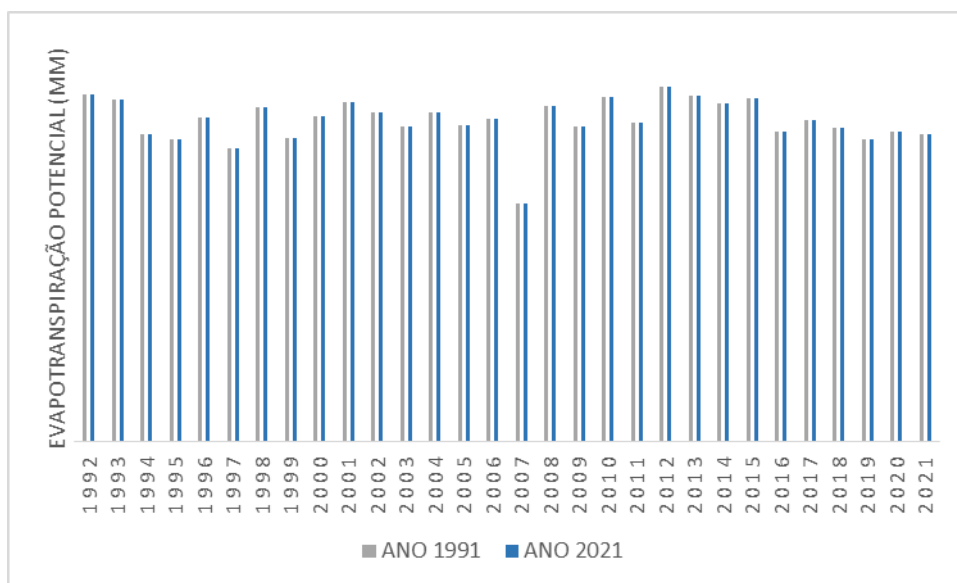
Portanto, embora os resultados obtidos pelo modelo apresentem valores de evapotranspiração semelhantes entre 1992 e 2021, é fundamental considerar as variáveis locais e os fatores que podem influenciar a precisão do modelo. A integração de dados de alta resolução, a consideração de mudanças no uso do solo e a análise de fatores climáticos específicos são essenciais para uma estimativa mais precisa da evapotranspiração na sub-bacia do rio Jauruçu.

6.3 Evapotranspiração Potencial (pet)

A evapotranspiração potencial representa a quantidade máxima de água que pode ser transferida da superfície terrestre para a atmosfera, considerando condições ideais de disponibilidade hídrica e sem limitações de umidade do solo. Esse processo

é influenciado por diversos fatores, incluindo temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Alterações nesses fatores podem impactar significativamente a PET, refletindo mudanças nas condições climáticas e no uso do solo. Nos gráficos a seguir, é apresentada a variabilidade desse processo no período de 30 anos simulado.

Figura 17: Evapotranspiração Potencial média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

Os resultados ds evapotranspiração potencial para a simulação de 1992 começam com 867,844 mm e atingem seu pico em 2012, com cerca de 887,952 mm, apresentando uma baixa tendência de variações, com flutuações anuais.

No cenário de 2021, observa-se uma leve alteração, começando com 867,846 mm e alcançando seu pico em 2012, com 887,954 mm, mas há pouca diferença entre os valores. Uma das explicações para essas alterações é o aumento da temperatura. Jones (1992) afirma que a radiação solar afeta diretamente a transpiração das plantas e a quantidade de água evaporada do solo, influenciando assim a PET. Outro fator é a alteração nas formas de uso do solo, sobre o qual os autores Pielke et al. (2002) discutem como o desmatamento e o processo de urbanização afetam o balanço de energias na superfície, influenciando a evapotranspiração e os climas locais. Bastiaanssen et al. (1998) destacam também a importância da cobertura vegetal para a estimativa de PET. Além disso, estudos como o de Vicente-Serrano et al. (2015)

indicam que a temperatura do ar pode influenciar a energia necessária para a vaporização da água, afetando a evapotranspiração potencial. Mudanças na cobertura do solo, como o desmatamento, podem alterar o balanço de energia na superfície, impactando a PET e os climas locais. A cobertura vegetal também desempenha um papel crucial na estimativa da PET, uma vez que diferentes tipos de vegetação apresentam taxas de evapotranspiração distintas. Para uma melhor compreensão, a TABELA 3 apresenta um resumo dessa análise na área de estudo, com intervalos de 10 anos.

Tabela 3: Análise de Evapotranspiração Potencial com intervalos de 10 anos

ANO	PET (1992) [mm]	PET (2021) [mm]	Tendência
1992	867.844	867.846	Estável
2000	811.657	811.659	Leve aumento
2010	859.784	859.786	Aumento
2012	887.952	887.954	Pico
2021	768.595	768.596	Leve redução

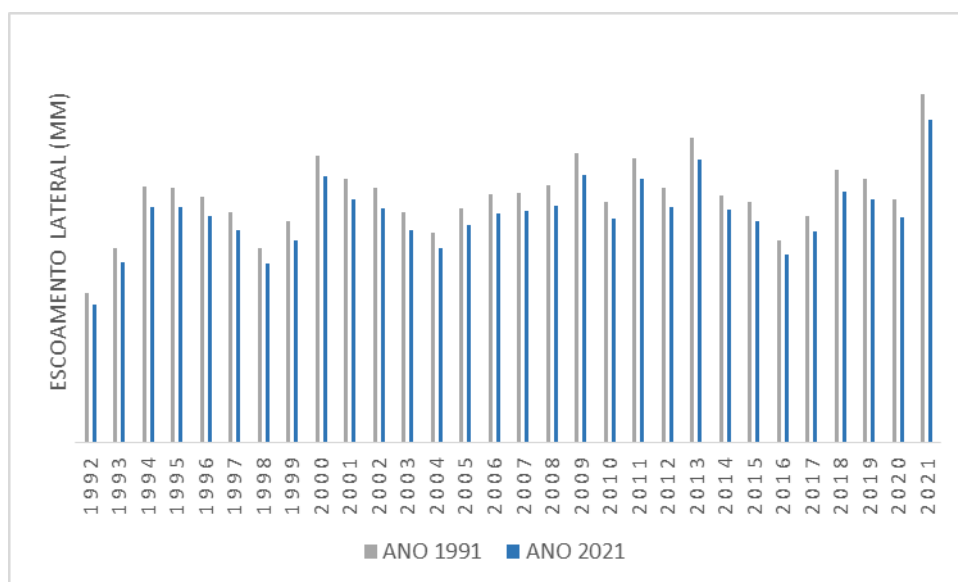
Fonte: Elaborado pela autora, por QSWAT, 2024

Como já mencionado, a diferença entre os valores é mínima, cerca de 0,002 mm. No ano de 2012, ocorreu o pico nos dois cenários simulados, pode estar associado ao aumento das temperaturas e, como apresentado no mapa de uso do solo (FIGURA 9), foi o período em que começaram a ocorrer maiores mudanças no uso do solo, como o avanço da pastagem na região.

6.4 Escoamento Lateral (latq)

O escoamento lateral ocorre quando a água infiltrada no solo encontra uma camada menos permeável, sendo assim, direcionada de forma lateral em direção aos rios e lagos (Tucci, 2000). Esse processo pode ser reduzido em áreas que contêm solos mais compactados e intensa atividade antrópica, afetando diretamente a disponibilidade hídrica. Algumas dessas alterações na sub-bacia do rio Jauruçu podem ser identificadas nos gráficos a seguir.

Figura 18: Escoamento Lateral média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.



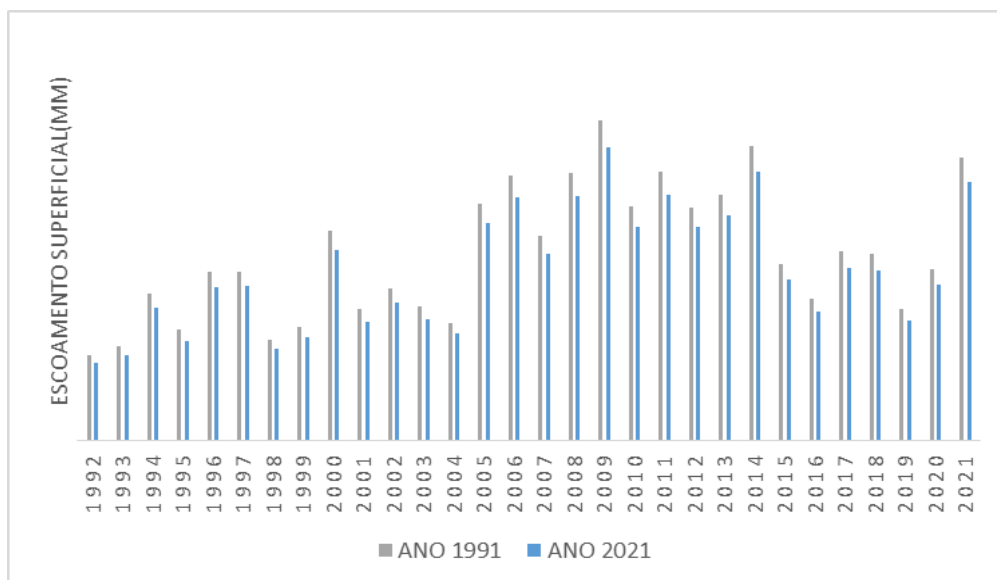
Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

No primeiro cenário, de 1992, o escoamento lateral era de aproximadamente 18,644 mm, conforme apresentado pelo modelo. No segundo cenário, de 2021, houve um aumento para aproximadamente 40,277 mm na média anual do escoamento lateral. Esse valor pode estar relacionado ao aumento da precipitação e ao maior volume de água que flui de forma lateral no solo.

6.5 Escoamento Superficial (surq_gen)

O escoamento superficial é a parcela da precipitação que não infiltra no solo, sendo influenciado por diversos fatores, como o tipo de solo, a cobertura vegetal e as características climáticas da região. Na sub-bacia do rio Jauruçu, os solos predominantemente arenosos (LAT) apresentam alta permeabilidade, o que tende a resultar em menor escoamento superficial devido à maior capacidade de infiltração da água. Nos gráficos a seguir, essa variável é apresentada nos cenários simulados.

Figura 19: Escoamento Superficial média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

No cenário simulado de 1992, obteve-se um valor equivalente a 646,812 mm, representando um índice relativamente baixo, o que pode indicar um balanço hídrico equilibrado, com boa infiltração no solo. No entanto, observou-se um aumento significativo no escoamento superficial a partir de 2009, atingindo valores máximos em 2009, tanto nos cenários de 1992 quanto de 2021. Esse aumento pode estar relacionado a mudanças no uso do solo, como o aumento do desmatamento, que reduzem a cobertura vegetal e aumentam a impermeabilidade do solo, resultando em maior escoamento superficial. Estudos indicam que a alteração do uso e ocupação do solo pode impactar significativamente o escoamento superficial, especialmente em áreas com solos de alta permeabilidade, como os arenosos (Santos, et. al. 2022).

Além disso, fatores climáticos, como a intensidade e a duração das precipitações, também influenciam o escoamento superficial. Mudanças climáticas podem alterar os padrões de precipitação, aumentando a intensidade das chuvas e, consequentemente, o escoamento superficial.

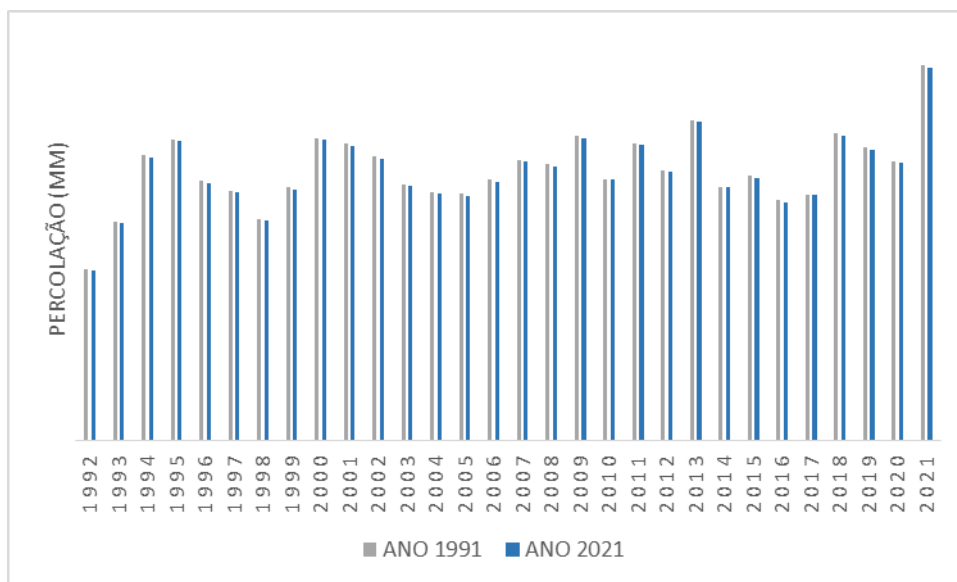
Em média, o ano de 1992 apresenta menor escoamento superficial, enquanto 2021 mostra um aumento. Portanto, embora os solos arenosos da sub-bacia do rio

Jauruçu apresentem características que favorecem a infiltração da água, mudanças no uso do solo e variações climáticas podem ter contribuído para o aumento do escoamento superficial observado. É fundamental considerar esses fatores para uma compreensão abrangente dos processos hidrológicos na região e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo de recursos hídricos.

6.6 Percolação (perc)

A percolação representa o movimento vertical da água no solo através de suas camadas até atingir o lençol freático, recarregando os aquíferos subterrâneos, que, por sua vez, abastecem rios e córregos durante períodos de estiagem. Esse processo é fundamental para a manutenção do equilíbrio hídrico e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. A análise desse processo é apresentada nos gráficos a seguir.

Figura 20: Percolação média anual da sub-bacia do rio Jauruçu, ano de 1991 e 2021.



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

No cenário inicial, com dados de uso do solo de 1991, o índice de percolação foi de 192,078 mm, apresentando o menor escoamento lateral. Enquanto no cenário

de 2021, o valor equivalente foi de 421,390 mm. A média foi de aproximadamente 300 mm. Considerando as características do solo na sub-bacia do rio Jauruçu, LAT, que possui textura arenosa, isso indica alta permeabilidade, com elevada infiltração, dificultando a retenção hídrica, o que caracteriza menor disponibilidade de água em períodos mais secos.

A textura do solo desempenha um papel crucial na percolação da água. Solos arenosos, como os presentes na sub-bacia do rio Jauruçu, possuem alta permeabilidade, permitindo que a água infiltre rapidamente, mas também resultando em menor capacidade de retenção hídrica. Isso significa que, durante períodos de seca, esses solos podem não reter água suficiente para sustentar as necessidades das plantas e manter os níveis dos aquíferos subterrâneos (Ottoni, 2003).

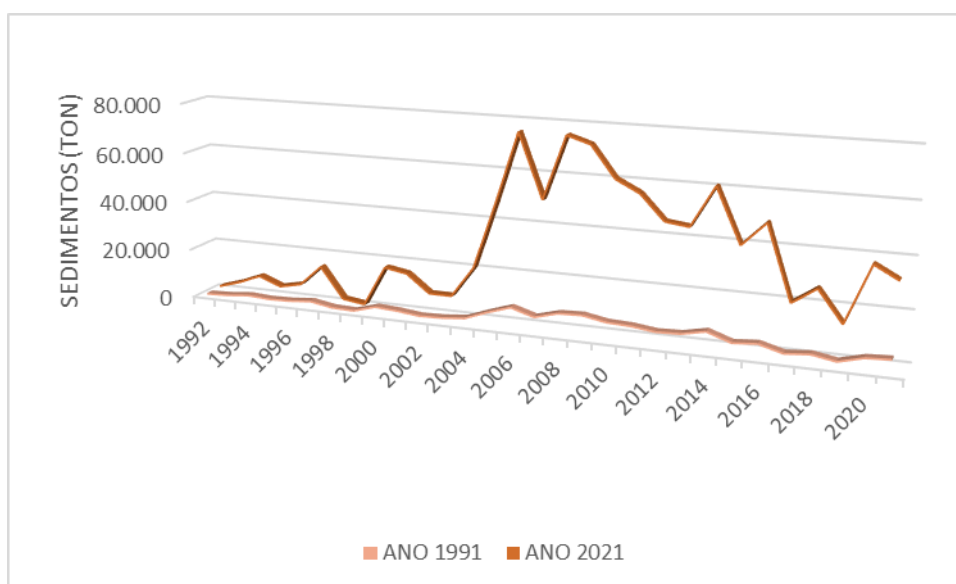
Além disso, práticas de uso do solo, como a agricultura intensiva e a urbanização, podem alterar a estrutura do solo, afetando sua capacidade de percolação. A compactação do solo, por exemplo, reduz a porosidade e a permeabilidade, dificultando a infiltração da água e aumentando o escoamento superficial. Isso pode levar a uma recarga inadequada dos aquíferos e a um aumento do risco de erosão e degradação do solo (Lal, 2015).

Portanto, é essencial considerar as características texturais do solo e as práticas de uso do solo ao avaliar a percolação e a disponibilidade hídrica em uma região. Estratégias de manejo sustentável, como a conservação da vegetação nativa e a adoção de práticas agrícolas que preservem a estrutura do solo, podem ajudar a manter a capacidade de percolação e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos. A análise da produção de sedimentos na sub-bacia do rio Jauruçu revela uma tendência de aumento nos valores de sedimentos transportados para o exutório, especialmente nos anos de 2005, 2006, 2008 e 2014. Esses picos podem ser atribuídos a mudanças significativas no uso do solo e a eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, que aceleram os processos erosivos e o transporte de sedimentos para os corpos d'água (Borrelli, 2017). Estudos recentes têm demonstrado que a expansão agrícola e o desmatamento são os principais fatores antrópicos que contribuem para o aumento da erosão do solo e, conseqüentemente, para a produção de sedimentos. Segundo Batista et al. (2019) destacam que a conversão de áreas florestais em pastagens ou cultivos agrícolas reduz a cobertura vegetal, aumentando a susceptibilidade do solo à erosão hídrica, especialmente

durante eventos de precipitação intensa. Além disso, a remoção da vegetação nativa diminui a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e o transporte de sedimentos para os rios (Foley et al, 2005).

Eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, têm sido cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas globais. Esses eventos exacerbam os processos erosivos, especialmente em áreas com solos expostos e pouca cobertura vegetal. Segundo Alatorre et al. (2012), a intensificação das chuvas em regiões tropicais tem sido associada ao aumento significativo da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, com impactos negativos na qualidade da água e na biodiversidade aquática. O primeiro cenário contém dados de uso do solo de 1991 e o segundo cenário, com dados de uso de 2021, está relacionado à precipitação. A comparação entre os dois cenários evidencia que as mudanças no uso do solo, como a expansão agrícola e o desmatamento, tiveram um impacto significativo na produção de sedimentos. Isso está alinhado com os resultados de Didoné, Minella e Merten (2015), que observaram que a conversão de áreas naturais em cultivos agrícolas pode aumentar a produção de sedimentos em até 10 vezes, dependendo da intensidade do manejo do solo e da topografia da região.

Figura 21: Produção de Sedimentos (t) na saída da Sub-bacia do Rio Jauruçu.



Fonte: elaborado pela autora, por QSWAT+, 2024.

Assim como os resultados das demais variáveis, os dados de sedimentos no exutório da sub-bacia do rio Jauruçu apresentam uma tendência de aumento, com picos em alguns anos, como em 2005, 2009 e 2014, conforme apresentado no gráfico. Esses resultados são considerados esperados diante das grandes mudanças no uso do solo e/ou dos eventos climáticos extremos. A literatura sugere que a combinação de fatores antrópicos e climáticos pode resultar em uma sinergia negativa, amplificando os impactos da erosão e do transporte de sedimentos. Walling (1983) destaca que a taxa de entrega de sedimentos (SDR) é influenciada não apenas pela erosão do solo, mas também pela capacidade de transporte dos rios, que pode ser aumentada durante eventos de chuva extrema.

No cenário de 1991, os valores variam de 865 toneladas a 9.420 toneladas. Observa-se que, em 1991, houve o menor valor de sedimentos, enquanto em 2009 foi registrado o maior valor. Esse aumento pode estar relacionado à intensificação das atividades agrícolas e à redução da cobertura vegetal ao longo das margens dos rios, que são fatores críticos para a retenção de sedimentos. Estudos como o de Beskow et al. (2009) mostram que a implementação de práticas conservacionistas, como o reflorestamento de áreas ripárias, pode reduzir significativamente a produção de sedimentos.

No cenário de 2021, o valor inicial foi de 722 toneladas de sedimentos, com os maiores valores alcançando 7.554 toneladas (em 2006 e 2008). Há um aumento significativo em comparação com o cenário de 1991, com altos índices nos anos de 2005, 2006, 2008 e 2014. Esse aumento pode ser explicado pela combinação de fatores antrópicos, como o desmatamento e a expansão agrícola, e eventos climáticos extremos. Segundo Morgan (2005), a erosão do solo em áreas agrícolas é um dos principais contribuintes para o assoreamento de rios e reservatórios, com impactos econômicos e ambientais significativos.

Os valores de sedimentos no cenário de 2021 são muito superiores aos valores de 1991. Em alguns anos, como 2006 e 2008, os valores apresentados no cenário de 2021 chegam a ser mais de 7 vezes maiores do que no cenário de 1991. Esse aumento pode ser considerado como uma consequência dos impactos antrópicos, como o alto índice de desmatamento e a expansão agrícola, ou até mesmo pelos eventos climáticos extremos, como chuvas intensas. Essas características estão presentes na área de estudo. A literatura sugere que a implementação de práticas de

manejo sustentável, como o plantio direto e a recuperação de áreas degradadas, pode mitigar esses impactos. Oliveira et al. (2015) demonstram que a adoção de práticas conservacionistas pode reduzir a produção de sedimentos em até 50%.

Diante desses resultados, o cenário mais atual, de 2021, sugere que a sub-bacia apresenta maior índice de erosão ou maior transporte de sedimentos para o seu exutório. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas e práticas de manejo que visem à conservação do solo e à redução dos impactos das mudanças climáticas. Programas como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) têm sido propostos como uma estratégia eficaz para incentivar a adoção de práticas conservacionistas em áreas críticas para a produção de sedimentos.

7 Discussão

Os resultados deste estudo revelam transformações significativas no balanço hídrico da Sub-Bacia do Rio Jauruçu ao longo de três décadas, com destaque para o aumento do escoamento superficial, a redução da evapotranspiração, o incremento na produção de sedimentos e a variabilidade interanual da precipitação. Esses achados estão alinhados com diversos estudos na literatura científica que exploram os impactos das mudanças no uso do solo e das alterações climáticas sobre os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, especialmente em regiões tropicais como a Amazônia. A sub-bacia teve um aumento de 59,85 mm, contendo um aumento em percentual de aproximadamente 125%, essa tendência de aumento na precipitação média anual observada na sub-bacia está em consonância com estudos que apontam para mudanças nos padrões pluviométricos globais e regionais, como destacado por Marengo et al. (2018), que relatam um aumento nas chuvas na Amazônia Ocidental, enquanto outras regiões, como a Amazônia Oriental, apresentam uma tendência de redução.

No entanto, a relação entre uso do solo e precipitação ainda é complexa, com Betts et al. (2008) argumentando que o desmatamento pode reduzir a precipitação local, enquanto mudanças nas práticas agrícolas podem ter efeitos diversos dependendo da região e do tipo de uso do solo. Jovinho et al (2022) a remoção da vegetação provoca a redução da interceptação da precipitação e a capacidade de infiltração do solo, resultando em maior escoamento superficial e, consequentemente

o aumento do transporte de sedimentos e processos erosivos. Esses processos erosivos é uma grande característica da sub-bacia do rio Jauruçu.

Como a atividade pecuarista é predominante na região, estudos como o de Silva et al (2020) que os solos compactados a partir do pisoteio do gado apresentam uma significativa redução de até 40% na taxa de infiltração, elevando assim o risco de assoreamento dos cursos d'água. Esses fatores influenciam na qualidade da água, podendo intensificar a turbidez e reduzir a disponibilidade hídrica para os abastecimentos e atividades produtivas.

Em relação à evapotranspiração, os valores praticamente idênticos entre 1992 e 2021 contrastam com estudos que sugerem uma forte relação entre cobertura vegetal e evapotranspiração, como destacado por Allen et al. (1998) e Monteith (1965). De acordo com os resultados simulados, houve uma redução de -0,049 m/ano, que em termos percentuais, reduziu cerca de 0,24%. A ausência de diferenças nos valores de evapotranspiração pode ser atribuída à limitação do modelo em capturar variações locais, como a influência da temperatura e da radiação solar, conforme discutido por Ruhoff et al. (2013). O aumento no escoamento superficial observado entre 1992 e 2021 está alinhado com a literatura que aponta o impacto do desmatamento e da expansão agrícola sobre o ciclo hidrológico, como demonstrado por Santos et al. (2022). O modelo apresentou um aumento médio de 44,64 mm/ano, esses resultados estão atrelados a substituição da cobertura florestal por pastagens e outros usos, o que intensifica os acontecimentos de enchentes, erosão e a produção de sedimentos. Os solos arenosos da Sub-Bacia do Rio Jauruçu, embora permeáveis, não foram suficientes para mitigar os efeitos das mudanças no uso do solo e das variações climáticas.

A análise da produção de sedimentos revela um aumento significativo ao longo do tempo, sendo de aproximadamente 222,97% especialmente em anos com eventos climáticos extremos, como apresentado no ano de 2006 de 722 toneladas para 7.554 toneladas em 2008, corroborando os achados de Batista et al. (2019), que destacam o papel do desmatamento e da agricultura na erosão do solo. A combinação de fatores antrópicos e climáticos amplifica os impactos, como discutido por Walling (1983) e Morgan (2005). Estudos como os de Beskow et al. (2009) e Oliveira et al. (2015) reforçam a importância de práticas conservacionistas, como o reflorestamento de áreas ripárias e o plantio direto, para reduzir a produção de sedimentos. Portanto, os

resultados deste trabalho corroboram e expandem os achados da literatura científica, destacando a interconexão entre mudanças no uso do solo, alterações climáticas e processos hidrológicos.

As implicações dessas mudanças são profundas para o ecossistema amazônico, exigindo estratégias adaptativas e colaborativas para garantir a sustentabilidade dos recursos naturais. Programas como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) têm sido propostos como estratégias eficazes para incentivar práticas sustentáveis em áreas críticas, conforme evidenciado por Didoné, Minella e Merten (2015). Embora este estudo tenha algumas limitações devem ser consideradas, como a precisão dos modelos hidrológicos, que pode ser aprimorada com dados meteorológicos de alta resolução e a incorporação de variáveis locais específicas. Estudos futuros poderiam explorar cenários prospectivos, considerando diferentes projeções climáticas e estratégias de manejo, para subsidiar decisões mais assertivas em políticas ambientais.

8 Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo analisar os impactos das mudanças no uso e ocupação do solo na hidrologia da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Jauruçu, utilizando o modelo SWAT+ como ferramenta central para a avaliação dos componentes hidrológicos. A pesquisa buscou responder questões fundamentais relacionadas às dinâmicas de transformação do uso do solo e seus efeitos no balanço hídrico, na produção de sedimentos e na sustentabilidade ambiental.

A análise multitemporal apresentou que o desmatamento e as práticas de manejo inadequadas foram os principais motores dessas alterações, resultando em impactos substanciais no equilíbrio hídrico da sub-bacia. Além disso, a redução da infiltração de água no solo, consequência da compactação e degradação geradas pelo uso intensivo de pastagens, destacou o papel crítico da manutenção da vegetação nativa na regulação hidrológica. Esses resultados fortalecendo o consenso científico sobre os impactos deletérios das expansões antrópicas desordenadas em regiões amazônicas.

No contexto mais amplo desse estudo, o trabalho contribuiu significativamente ao integrar técnicas de modelagem hidrológica e geoprocessamento para avaliar mudanças ambientais em uma área de difícil monitoramento, como o caso da Sub-Bacia do Rio Jauruçu e destacando a importância de ferramentas como o modelo SWAT na análise de bacias hidrográficas tropicais, ressalta-se no custo benefício dessas ferramentas por estarem disponibilizadas gratuitamente. A identidade do modelo em representar tendências hidrológicas, mesmo em condições de dados limitados, evidenciou sua aplicabilidade para estudos em áreas remotas, como a Amazônia, e reforçou sua utilidade para subsidiar políticas públicas de gestão sustentável. A pesquisa também demonstrou como a combinação de dados multitemporais e modelagem pode oferecer relevantes para compreender a interação entre fatores antrópicos e naturais em sistemas hidrológicos complexos, promovendo uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas voltadas à conservação.

Entretanto, a pesquisa reconheceu limitações importantes, como a ausência de dados de calibração local, que restringiu o refinamento das simulações realizadas. Embora o uso de parâmetros baseados na literatura tenha permitido bons resultados, o acompanhamento contínuo da região seria essencial para aprimorar a precisão dos modelos e fornecer análises ainda mais detalhadas. Além disso, as lacunas no monitoramento hidrológico da região amazônica foram identificadas como um obstáculo recorrente em estudos dessa natureza, reforçando a necessidade de iniciativas para expandir as redes de monitoramento e coleta de dados em sub-bacias como a do Rio Jauruçu, que passam por um processo de intenso uso do solo.

Com base nos resultados obtidos, propõem-se direções futuras que incluem a implementação de estações de monitoramento hidrometeorológico na sub-bacia, com o objetivo de melhorar a calibração e a validação de modelos hidrológicos, além de ampliar o conhecimento sobre as dinâmicas locais. A avaliação de longo prazo dos impactos do reflorestamento e das práticas de manejo sustentável também é altamente recomendada, a fim de identificar estratégias eficazes para mitigar os danos causados pela ocupação humana desordenada. Além disso, a integração do modelo SWAT com outros métodos analíticos, como modelagem climática, pode fornecer projeções mais robustas e abrangentes para o planejamento ambiental e adaptação, principalmente no atual cenário de mudanças globais.

A pesquisa representa uma contribuição relevante tanto para a compreensão dos desafios hidrológicos específicos da Sub-Bacia do Rio Jaurucu quanto para o debate mais amplo sobre o manejo sustentável dos recursos naturais na região Amazônia.

9 Referências Bibliográficas

Ab'Sáber, A. N. (2003). *Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas*. São Paulo: Ateliê Editorial.

ALVAREZ, Wellington Pinho. Amazônia de domínio da união: expressões da ordem-desordem na exploração do potencial paisagístico na bacia do Jaurucu, baixo rio Xingu–Pará. 2020.198 f. Tese (Doutorado em Geografia)–Universidade Federal do Pará, Belém.

ARNOLD, Jeffrey G.; FOHRER, Nicola. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 19, n. 3, p. 563-572, 2005.

BARBOSA, G.V.; RENNÓ, C.V.; FRANCO, E.M.S. Geomorfologia. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. Projeto RADAMBRASIL. Folha SA.22-Belém; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1974. p. 1-36. (Levantamento dos Recursos Naturais, 5.)

BARRELLA, Walter.; PETRERE, Miguel.; SMITH, Welber.; MONTAG, Luciano. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H. F. *Matas ciliares: Conservação e recuperação*. EDUSP, 2ª ed., São Paulo, p. 187-207, 2001.

BASTIAANSSEN, Wim GM; MOLDEN, David J.; MAKIN, Ian W. Sensoriamento remoto para agricultura irrigada: exemplos de pesquisa e possíveis aplicações. *Agricultural water management* , v. 46, n. 2, p. 137-152000.

BDIA. *Banco de Dados de Informações Ambientais: Características dos Solos Brasileiros*. 2020. Disponível em: <https://www.bdia.embrapa.br>. Acesso em: 10 out. 2023.

BECKER, Bertha Koiffmann. Novas territorialidades na Amazônia: desafio às políticas públicas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 5, p. 17-23, 2010.

BETTS, Richard A.; ROBERTS, J. Timmons. O futuro da Amazônia: novas perspectivas do clima, ecossistema e ciências sociais. ***Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*** , v. 363, n. 1498, p. 1729-1735, 2008.

BONUMÁ, Nadia Bernardi.; REICHERT, José Miguel.; RODRIGUES, Miriam Fernanda.; MONTEIRO, José Alberto Fernandez.; ARNOLD, Jeffrey.; SRINIVASAN, Raghavan. 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.

BONUMÁ, Nadia Bernardi.; REICHERT, José Miguel.; RODRIGUES, Miriam Fernanda.; MONTEIRO, José Alberto Fernandez.; ARNOLD, Jeffrey.; SRINIVASAN, Raghavan. 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.

BORRELLI, Pasquale et al. Uma avaliação do impacto global da mudança do uso da terra no século XXI na erosão do solo. **Nature communications** , v. 8, n. 1, p. 1-13, 2017.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e sociedade*, 2011.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e sociedade*, 2011.

BRIONES, Romel.; ELLA, Victor.; BANTAYAN, Natanael. Hydrologic Impact Evaluation of Land Use and Land Cover Change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Management*, v. 19, p. 96-107, 2016.

BRIONES, Romel.; ELLA, Victor.; BANTAYAN, Natanael. Hydrologic Impact Evaluation of Land Use and Land Cover Change in Palico Watershed, Batangas, Philippines Using the SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Management*, v. 19, p. 96-107, 2016.

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. FEITOSA, AC; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, v. 2, p. 35-52, 1997.

CALDAS, Marcellus Marques. et al. Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários. *Revista Brasileira de Economia*, v. 57, n. 4, p. 683-711, 2003.

CALDAS, Marcellus Marques. et al. Ciclo de vida da família e desmatamento na Amazônia: combinando informações de sensoriamento remoto com dados primários. *Revista Brasileira de Economia*, v. 57, n. 4, p. 683-711, 2003.

CASTRO FILHO, Hugo Crisóstomo de.; STAINKE, Ercília Torres .; STAINKE, Valdir Adilson. Análise espacial da precipitação pluviométrica na bacia do lago Paranoá: comparação de métodos de interpolação. *Revista Geonorte*, v. 1, n. 5, p. 336-345, 2013.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. 2013. 122 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geociências), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. 2013. 122 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geociências), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CHAUVEL, Armand. Contribuição para o estudo da evolução dos latossolos amarelos, distróficos, argilosos na borda do platô, na região de Manaus: mecanismos da gibbsitização. *Acta Amazonica*, v. 11, n. 2, p. 227-245, 1981.

CLARKE, Robin T.; DIAS, PL Silva. As necessidades de observação e monitoramento dos ambientes brasileiros quanto aos recursos hídricos. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Recursos Hídricos, 2002.

Costa, M. L.; Angélica, R. S.; Carmo, M. S. (2003). *Lateritas da Amazônia: Uma Revisão sobre sua Gênese e Evolução*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 145-158

COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S.; CARMO, M. S. *Lateritas da Amazônia: Uma Revisão sobre sua Gênese e Evolução*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 2, p. 145-158, 2003.

CUARTAS, Luz Adriana.; TOMASELLA, Javier.; NOBRE, Antônio Donato.; NOBRE, Carlos Afonso.; HODNETT, Martin.; WATERLOO, Maarten J.; MOTA DE OLIVEIRA, Sylvia. Distributed hydrological modeling of a microscale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 462-463, p. 15-27, 2012.

DANTAS, Marcelo Eduardo et al. Origem das paisagens. 2014.

DE ASSIS ESTEVES, Francisco. Fundamentos de limnologia. Interciência, 1998.

DE PAULA, M. O rural pós-hidrelétrica: das modificações no trabalho às alterações no uso do solo na agrovila princesa do xingu em altamira em consequência da uhebm. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Geografia, 2017b.

DE SOUZA, Luciandro Tassio Ribeiro; BRASILEIRO, Tania Suely Azevedo. Amazônia (s):: entre a internacional e a legal, existe poesia autoral em discussão!. *Amazônica-Revista de Psicopedagogia, Psicologia escolar e Educação*, v. 16, n. 2, jul-dez, p. 1063-1092, 2023.

Dias-Filho, M.B.; Andrade, C.M.S. 2006. *Pastagens no trópico úmido*. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 30p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 241).

DO AMARAL SILVA, Jefferson Fernandes; PEREIRA, Roberto Guimarães. Panorama global da distribuição e uso de água doce. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 10, n. 3, p. 263-280, 2019.

Embrapa (2018). *Solos do Brasil: Características e Potencialidades*. Brasília: Embrapa Solos.

FERREIRA, Fernanda N. et al. Gestão de recursos hídricos na Amazônia: um panorama da participação da sociedade civil nos espaços deliberativos. *Holos*, v. 8, p. 336-351, 2017.

FIGUEIRAS, Gisalda Carvalho; HERRERA, José Antonio. O segmento da agricultura familiar no estado do Pará: um olhar a partir dos dados do Censo de 2006. *Cadernos Cepec*, v. 1, n. 7-12, 2012.

FOLEY, Jonathan A. et al. Global consequences of land use. **science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FREITAS, Jaylim Reis de et al. Análise da vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do Jaurucu–Brasil Novo Pará. 2022.

FUNK, Chris et al. Os riscos climáticos da precipitação infravermelha com estações — um novo recorde ambiental para monitoramento de extremos. **Dados científicos**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and futures research directions. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GASSMAN, Phillip. W.; SADEGHI, Ali M.; SRINIVASAN, Raghavan. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 2014. Disponível em: <http://www.journalofenvironmentalquality.org>. Acesso em: 19 mar. 2015.

GASSMAN, Phillip. W.; SADEGHI, Ali M.; SRINIVASAN, Raghavan. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. *Journal of Environmental Quality*, 2014. Disponível em: <http://www.journalofenvironmentalquality.org>. Acesso em: 19 mar. 2015.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

GOMES, L. C. et al. Disentangling the Historic and Future Impacts of Land Use Changes and Climate Variability on the Hydrology of a Mountain Region In Brazil. *Journal of Hydrology*, [s. l.], v. 594, 125650, 2021.

Gomez, J. B., Webler, A. D., Aguiar, R. G., Aguiar, L. J. G., & Nuñez, M. L. A. (2021). CONVERSÃO DE FLORESTAS TROPICAIS EM SISTEMAS PECUÁRIOS NA AMAZÔNIA: QUAIS AS IMPLICAÇÕES NO MICROCLIMA DA REGIÃO?. *Revista Brasileira De Climatologia*, 17. <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.42879>

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Folhas da Carta Brasil. São Paulo, 1971.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Folhas da Carta Brasil. São Paulo, 1971.

IBGE. Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 1 mapa, color., escala 1:5.000.000.

IBGE. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, JERSZURKI, Daniela; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 118-129, 2015.

JERSZURKI, Daniela; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 118-129, 2015.

JONES, Hamlyn G. Plantas e microclima: uma abordagem quantitativa à fisiologia ambiental das plantas. 1992.

KANAI, Juan Miguel; DA SILVA OLIVEIRA, Rafael. DESENVOLVIMENTO REGIONAL E SUAS CONSEQUÊNCIAS EM RORAIMA: NOTAS PRELIMINARES A PARTIR DA BR-174 (Regional Development and Its Consequences in Roraima: preliminary notes based on the BR-174 roadway). *ACTA GEOGRÁFICA*, p. 103-116, 2011.

KRYSANOVA, Valentina; ARNOLD, Jeffrey G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT—a review. *Hydrological Sciences Journal*, v. 53, n. 5, p. 939-947, 2008.

Lal, R. (2015). **Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation**. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

LAMBIN, E.; GEIST, H. Land-use and land-cover change: local processes and global impacts. Springer, IGBP Series, 2006.

Lepsch, I. F. (2010). *Formação e Conservação dos Solos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

LEPSCH, Igo F. Formação e conservação dos solos. Oficina de textos, 2016.

LEPSCH, Igo F. Formação e conservação dos solos. Oficina de textos, 2016.

LI, M.; SHAO, Q.; ZHANG, L.; CHIEW, F. H. S. A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, v. 389, n. 1-2, p. 137-145, 2010.

LIMA, Danielli Gomes. Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial no município de Nova Xavantina-MT. 2019.

MACHADO, R. .E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 154 f.b Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAIA, R. F.; SANTANA, J. E.; MATEUS, R. L. M.; CORDERO, M. E.; DA SILVA, M. M. M.; CARVALHO, C. R.; MORAIS, L. L.; BRAGANÇA, J. F. S.; FRANCO, S. S. Desafios da gestão dos recursos hídricos no Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 5-12, 2013.

MAIDMENT, D, R. (1993). Hydrologic Cycle. In: *Handbook Of Hydrology*. McGraw- Hill, 2ªEd, 1.1-15p.

Malluta, D. (2012). *Modelagem hidrológica com o SWAT: Fundamentos e aplicações*. Editora UFPR.

Marengo et al. (2018): "Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends".

MARENGO, Jose A. et al. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MARENGO, José et al. Aquecimento Global e Mudança Climática na Amazônia: Retroalimentação Clima-Vegetação e Impactos nos Recursos Hídricos. *Geophysical Monograph Series*, v. 186, p. 1-24, 2010.

MARTINS, N. V. Análise da qualidade da água na sub-bacia do Jaurucu–Brasil Novo Pará. 2020.

MEDEIROS, A. S.; ROCHA, R. M.; GOMES, C. H. M. Caracterização das bacias hidrográficas da região metropolitana de Belém. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 3, p. 123-136, 2006.

M
EDEIROS, J. B. Redação científica: prática de fichamentos, resumos e resenhas. 13º ed. São Paulo, Atlas, 2019.

MELO, V. C.; CAVALCANTI, R. V.; SOARES, F. M.; VIEIRA, J. M. Proposta de um modelo de predição da qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana:

um estudo de caso na bacia do rio Ipanema. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 85-94, 2014.

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

MIRANDA, L. E. Gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio Xingu. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 7, n. 1, p. 75-88, 2012.

MOLINA, S.; SÁ, P. R. Capacidades locais para a gestão do desenvolvimento sustentável. *Revista de Gestão de Projetos*, v. 8, n. 3, p. 174-184, 2017.

MONTENEGRO, S. M. et al. Qualidade e gestão da água em áreas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 97-105, 2014.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation:

NUNES, José M. Aspectos das relações sociais e ambientais na gestão da água. *Revista da Gestão de Águas do Brasil*, v. 4, n. 1, p. 33-41, 2012.

OLIVEIRA, L. S.; MEDEIROS, A. S.; CAMPOS, E. J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas urbanas. *Águas e Cidades*, v. 4, p. 5-21, 2020.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. Classificação das Florestas Ombrófilas Densas no Brasil. In: *Florestas Atlânticas: Ecologia e Conservação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

OTTONI FILHO, T. B. Uma classificação físico-hídrica dos solos. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, v. 27, p. 211-222, 2003.

PAULUS, V. R. Desmatamento e suas consequências: uma análise da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 25, n. 72, p. 157-167, 2011.

PIELKE SR, Roger A. et al. A influência da mudança no uso da terra e da dinâmica da paisagem no sistema climático: relevância para a política de mudança climática além do efeito radiativo dos gases de efeito estufa. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Série A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 360, n. 1797, p. 1705-1719, 2002. PINTO, N. L. S. et al. *Hidrologia básica*. São Paulo: Blucher, 1976.

PIELKE SR, Roger A. et al. A influência da mudança no uso da terra e da dinâmica da paisagem no sistema climático: relevância para a política de mudança climática além do efeito radiativo dos gases de efeito estufa. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Série A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 360, n. 1797, p. 1705-1719, 2002. PINTO, N. L. S. et al. *Hidrologia básica*. São Paulo: Blucher, 1976.

PRATES, Rodolfo Coelho; BACHA, Carlos José Caetano. Os processos de desenvolvimento e desmatamento da Amazônia. *Economia e Sociedade*, v. 20, p. 601-636, 2011. Publications, 1995. p.

REZENDE, Carlos André. O papel das áreas protegidas na conservação da biodiversidade na Amazônia. *Caderno de Recursos Naturais e Desenvolvimento*, v. 2, n. 1, p. 27-42, 2011.

ROCHA, A.K.P. Processos hidrológicos da bacia do Rio Pajeú: revisão revisão sistemática e uso do SWAT, e uma análise de tendências pelo método simplificado do balanço hídrico climatológico. 134f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, 2021

RODIGUES, EL; ELMIR, MAT; JACOBI, CM; LAMOUNIER, WL Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. *Soc. não*. 27, n. 3, pág. 485-500, 2015.

SANTANA, J. E.; PEREIRA, M. L.; SOUSA, J. M. Impacto da expansão do cultivo da soja sobre a dinâmica do uso do solo no cerrado. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 24, n. 2, p. 45-57, 2016.

SANTOS, Joyse Tatiane Souza dos et al. Aplicação do modelo hidrológico swat para a sub-bacia do rio Arapepó (Salinópolis/Pa). 2023. Tese de Doutorado. UFRA-Campus Belém.

AXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 5, p. 1569-1578, 2006. DOI: [10.2136/sssaj2005.0117](https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117).

SILVA, D. C.; SOARES, F. M.; ALMEIDA, L. R.; VALDEZ, M. Aplicação do modelo SWAT para avaliar os efeitos de cenários de uso da terra sobre a qualidade da água em bacias hidrográficas urbanas. *Cadernos de Geografia*, v. 16, n. 3, p. 103-115, 2019.

SILVA, F. R. et al. Vulnerabilidade hídrica e gestão das águas: desafios para o desenvolvimento sustentável na Amazônia. *Águas e Cidades*, v. 5, n. 2, p. 41-56, 2021.

SINGH, P. 1995. Computer models of watershed hydrology. Boulder, Water Resources Publications. 1995, 1144p.

SINGH, V. P. Computer models of watershed hydrology. Water Resources

TAVARES, M. J. R.; BRANCO, M. F.; VIEIRA, S. S. A bacia do Rio Xingu e os desafios da gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 1, p. 53-66, 2012.

Tricart, J. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE.

TUCCI, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 652p.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. Recursos hídricos no século XXI. Oficina de textos, 2011.

VAN HOUTTE, E.; PEETERS, J.; VANHOVE, S.; VAN ZANDT, L. Assessing the water balance and water quality in a small agricultural catchment. *Agricultural Water Management*, v. 96, n. 3, p. 470-479, 2009.version 2005. Temple: Blackland Research Center, 2005.

VIDICH, A. J., LYMAN, Satanford M. Métodos qualitativos: sua história na sociologia e na antropologia. In: DENZIN, N. K; LINCOLN, I.O planejamento da pesquisa qualitativa: teorias e abordagens. Porto Alegre: Artmed, 2006.

VISSMAN JR., W. & LEWIS, G. L. 1996. Introduction to hydrology. New York. Haper Collins College Publishers. 4 ed.

VITTE, A. C. Um resgate histórico sobre a bacia hidrográfica no contexto do imperialismo dos séculos XVII e XVIII. Os casos da França e da Inglaterra. *Terr@ Plural*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 11–21, 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/9660>

ZUO, D; XU, Z; PENG, D, SONG, J; CHENG, L; WEI, S; ABBASPOUR, K.C; YANG,H. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis. *Hydrological Processes*, vol. 29, no. 8, p. 1942-1955, 2015.