



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

DANIEL ARRUDA CARVALHO

**MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E IMPACTO NO CICLO
HIDROLÓGICO: REGIÃO DE INFLUÊNCIA DO RIO JAVAÉS**

Palmas/TO
2025

DANIEL ARRUDA CARVALHO

**MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E IMPACTO NO CICLO
HIDROLÓGICO: REGIÃO DE INFLUÊNCIA DO RIO JAVAÉS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre (a) em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dra. Roberta Mara De Oliveira Vergara

Palmas/TO
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A779m Arruda Carvalho, Daniel.

Mudanças no uso e ocupação da terra e impacto no ciclo hidrológico: região de influência do rio Javaés. / Daniel Arruda Carvalho. – Palmas, TO, 2025.

94 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2025.

Orientadora : Roberta Mara De Oliveira Vergara

1. Modelagem hidrológica. 2. Gestão de recursos hídricos. 3. Ações antrópicas. 4. Modelo hidrológico SWAT e de dinâmica espacial Dinamica EGO. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DANIEL ARRUDA CARVALHO

**MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA E IMPACTO NO CICLO
HIDROLÓGICO: REGIÃO DE INFLUÊNCIA DO RIO JAVAÉS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental foi avaliada para a obtenção do título de Mestre (a) em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 29 /09 /2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. José de Oliveira Melo Neto, UFT

Prof. Dr. Daniel de Brito Fragoso, Embrapa

Profa. Dra. Roberta Mara De Oliveira Vergara, UFT

*Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e o conhecimento.
(Pr 2:6)*

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai, pelo dom da vida. Ao meu Senhor e Salvador Jesus Cristo, por Sua graça e misericórdia, que me deram saúde e força para alcançar meus objetivos.

À minha esposa, Milena Negreiro, por todo o conforto e alegria nos dias mais cansativos; uma grande companheira, que me motiva a me dedicar e a acreditar sempre.

Ao meu falecido pai, José Rejanio, pela sua bondade e senso de humor, por ter-me ensinado o que é resiliência na prática e por nunca reclamar, independentemente da situação.

À minha querida mãe, Rejane Carvalho, pela sua sabedoria e apoio nos momentos de dificuldade, e por sua dedicação em me instruir e educar durante toda a minha vida.

Ao meu primo José Belarmino, que nos deixou tão cedo, por ter-me apresentado à engenharia, por ter sido uma pessoa exemplar e um homem de valor.

À minha orientadora, Roberta Vergara, um exemplo de docente, sempre muito solícita e pronta para me auxiliar.

Aos meus amigos e familiares, que estiveram presentes em todos os momentos.

RESUMO

A modelagem hidrológica tem se destacado como ferramenta eficaz no planejamento e gestão de recursos hídricos, possibilitando avaliar e prever o impacto das ações antrópicas na hidrologia de uma bacia hidrográfica. Este trabalho avaliou a relação entre as mudanças no uso e ocupação da terra e a disponibilidade hídrica na região de influência do rio Javaés, Tocantins, utilizando os modelos hidrológicos SWAT e de dinâmica espacial Dinamica EGO. A pesquisa analisou os impactos da atividade agrícola entre 2004 e 2023 e projetou um cenário futuro para 2043. Dados de uso e ocupação, solo, declividade, e informações climáticas e fluviométricas foram processados. A calibração e validação do SWAT demonstraram desempenho satisfatório. Entre 2004 e 2023, houve uma redução de 8,24% na vegetação nativa (Cerrado -21,03%) e expansão de pastagem, arroz e soja. Essas alterações resultaram em um aumento das vazões médias do rio (+0,27 m³/s em Barreira do Pequi e +0,32 m³/s em Fazenda COBRAPE), indicando menor retenção de água na bacia. A projeção para 2043 prevê a continuidade da expansão agrícola (arroz para 3,64%, soja para 1,60%, pastagem para 25,23%) e retração do cerrado para 19,91%. Este cenário futuro aponta para um aumento de aproximadamente 0,6 m³/s nas vazões médias mensais, com picos mais elevados no período chuvoso e menores no período seco, evidenciando um sistema hidrológico menos resiliente. Conclui-se que a conversão da vegetação nativa para usos agropecuários afeta hidricamente a região, evidenciando a necessidade de planejamento territorial integrado, que concilie a vocação agropecuária regional com a sustentabilidade dos recursos hídricos no rio Javaés.

Palavras-chaves: Modelagem, SWAT, Dinamica EGO, Vazão.

ABSTRACT

Hydrological modeling has proven to be an effective tool for planning and managing water resources, allowing the assessment and prediction of anthropogenic impacts on the hydrology of a watershed. This study evaluated the relationship between land use and land cover changes and water availability in the region influenced by the Javaés River, Tocantins State, using the SWAT hydrological model and the Dinamica EGO spatial dynamics model. The research analyzed the impacts of agricultural activity between 2004 and 2023 and projected a future scenario for 2043. Land use and land cover, soil, slope, climatic, and streamflow data were processed. The calibration and validation of the SWAT model showed satisfactory performance. Between 2004 and 2023, native vegetation decreased by 8.24%, with a 21.03% reduction in Cerrado formations, alongside the expansion of pasture, rice, and soybean crops. These changes resulted in increased mean river flows (+0.27 m³/s at Barreira do Pequi and +0.32 m³/s at Fazenda COBRAPE), indicating reduced water retention capacity in the basin. The 2043 projection indicates continued agricultural expansion (rice to 3.64%, soybean to 1.60%, and pasture to 25.23%) and Cerrado reduction to 19.91%. This future scenario suggests an increase of approximately 0.6 m³/s in average monthly flows, with higher peaks during the rainy season and lower ones in the dry period, revealing a less resilient hydrological system. It is concluded that the conversion of native vegetation to agricultural uses affects the basin's water dynamics, highlighting the need for integrated land-use planning that reconciles the region's agricultural vocation with the sustainability of the Javaés River water resources.

Key-words: Modeling, SWAT, Dinamica EGO, Flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ciclo Hidrológico.	19
Figura 2: Fluxograma das equações no modelo SWAT.....	22
Figura 3: Relação entre precipitação e escoamento no método CN.....	24
Figura 4: Fluxograma metodológico.	31
Figura 5: Localização da Bacia do rio Javaés no Estado do Tocantins.....	32
Figura 6: Planície aluvial que compõe o relevo.	33
Figura 7: Precipitação média mensal do rio Javaés estação de Barreira da Cruz (2005-2024).	34
Figura 8: Trecho do rio Javaés – Mata Ciliar.....	35
Figura 9: Trecho do rio Javaés – Solos das margens.	37
Figura 10: Fonte dos dados Tabulares e Cartográficos utilizados na modelagem.	38
Figura 11: Modelo Digital de Elevação (MDE) da Bacia do rio Javaés.	39
Figura 12: Mapa de declividade da Bacia do rio Javaés.	40
Figura 13: Mapa pedológico da Bacia do rio Javaés.....	41
Figura 14: Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Javaés 2004.	44
Figura 15: Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Javaés 2023.	45
Figura 16: Fluxograma dos dados requeridos pelo modelo SWAT.	49
Figura 17: Fluxograma de execução do SWAT.	50
Figura 18: Fluxograma de funcionamento geral do Dinamica EGO.....	53
Figura 19: Principais funtores utilizados na execução do cenário prognóstico.....	55
Figura 20: Determinação das matrizes de transição.....	55
Figura 21: Criação do cubo raster.	56
Figura 22: Determinação dos intervalos dos pesos de evidência.	57
Figura 23: Determinação dos coeficientes dos pesos de evidência.....	58
Figura 24: Criação do mapa de probabilidade e do mapa de uso e ocupação futuro.	59
Figura 25: Delimitação da bacia e sub-bacias.....	61
Figura 26: Hidrografia da bacia gerada.....	62
Figura 27: Território Indígena contido na região de influência do rio Javés.	65
Figura 28: Agricultura e pastagem sobre o território Indígena na região de influência do rio Javaés no ano de 2023.	66
Figura 29: Comparativo entre vazão simulada e vazão observada de Barreira do Pequi 68	68
Figura 30: Comparativo entre vazão simulada e vazão observada da estação de Fazenda COBRAPE	69
Figura 31: Análise de sensibilidade dos parâmetros.	71
Figura 32: Relação dos parâmetros com o coeficiente NS.....	72
Figura 33: Inserção dos novos parâmetros no modelo.....	73
Figura 34: Comparativo: vazão simulada calibrada e vazão observada em Barreira do Pequi.....	74
Figura 35: Comparativo: vazão simulada calibrada e vazão observada em Fazenda COBRAPE....	74
Figura 36: Relação precipitação com produção de água na Bacia.	75
Figura 37: Gráfico de dispersão entre os valores de vazões observadas e simuladas pelo SWAT com calibração de parâmetros – Estação Barreira do Pequi 77	77
Figura 38: Gráfico de dispersão entre os valores de vazões observadas e simuladas pelo SWAT com calibração de parâmetros – Estação Fazenda COBRAPE.....	78
Figura 39: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.....	80
Figura 40: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.....	82
Figura 41: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.....	83
Figura 42: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.....	84
Figura 43: Gráfico comparativo das vazões simuladas para os cenários de 2023 e 2043.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros dos solos.	42
Tabela 2: Adaptação dados de Uso e ocupação da terra.	43
Tabela 3: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Lagoa da Confusão.	46
Tabela 4: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Formoso do Araguaia.	47
Tabela 5: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Sandolândia.	47
Tabela 6: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Fazenda COBRAPE.	48
Tabela 7: Índices estatísticos e sua classificação quanto o desempenho.	52
Tabela 8: Transições adotadas.	57
Tabela 9: Uso e cobertura.	63
Tabela 10: Tipos de solos.	64
Tabela 11: Declividade.	64
Tabela 12: Calibração de Parâmetros.	70
Tabela 13: Índices estatísticos comparativos da calibração e validação.	76
Tabela 14: Vazão média no trecho de Barreira do Pequi, para os cenários de 2004 e 2023.	79
Tabela 15: Vazão média no trecho de Fazenda COBRAPE, para os cenários propostos de 2004 e 2023.	79
Tabela 16: Área de cerrado, campos e agricultura nos cenários propostos.	81
Tabela 17: Vazão média no trecho de Barreira do Pequi, para os cenários de 2023 e 2043.	85
Tabela 18: Vazão média no trecho de Fazenda COBRAPE, para os cenários propostos de 2023 e 2043.	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
Objetivo Geral	15
Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 OCUPAÇÃO TERRITORIAL DA REGIÃO DO MÉDIO ARAGUAIA.....	16
2.2 DESCRIÇÕES DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS	18
2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	19
2.3.1 Modelo SWAT.....	20
2.3.2 Parâmetros do modelo SWAT que influem na análise de mudanças do uso e cobertura da terra.....	21
2.3.2.1 Processos Hidrológicos.....	22
2.3.2.2 Escoamento Superficial.....	23
2.3.2.3 Evapotranspiração:	25
2.3.2.4 Escoamento Lateral:.....	25
2.3.2.5 Produção de Sedimentos:	26
2.3.3 Modelo Dinamica EGO.....	26
2.3.4 Aplicações dos modelos SWAT e Dinamica EGO	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1.1 SEQUÊNCIA METODOLÓGICA	31
3.2 ÁREA DE ESTUDO	31
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	32
3.4 DADOS	37
3.4.1 Modelo Digital do Elevação (MDE)	38
3.4.2 Solo.....	40
3.4.3 Uso e Ocupação da Terra	43
3.4.4 Climatologia e Hidrografia.....	46
3.5 FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT	48
3.6 CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	50
3.7 FUNCIONAMENTO DO MODELO DINAMICA EGO.....	53
3.8 SIMULAÇÃO PROPOSTA E CENÁRIO PROGNÓSTICO.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	60
4.2 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA (URH'S).....	62
4.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	67
4.4 CALIBRAÇÃO	69
4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	76
4.6 RESPOSTA HÍDRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO JAVAÉS ÀS ALTERAÇÕES OCORRIDAS ENTRE 2004 E 2023.....	78
4.7 SIMULAÇÃO DE CENÁRIO NO DINAMICA EGO.....	80
4.8 IMPACTOS HIDROLÓGICOS NO CENÁRIO PROGNÓSTICO (INTEGRAÇÃO DINAMICA EGO-SWAT)	84
5 CONCLUSÕES	89
6 REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico e a elevação dos padrões de vida da população, gera significativo aumento nas demandas hídricas de uma região. A produção de energia, irrigação, o uso industrial e consumo urbano, são exemplos de usos da água fundamentais para o desenvolvimento e manutenção da sociedade. Alterações repentinas e imprevisíveis na disponibilidade da água doce causam dúvidas e incertezas nos gestores dos recursos hídricos, tendo em vista os prejuízos advindos do desabastecimento (ABBASPOUR et al., 2015).

A compreensão da relevância dos recursos hídricos pela sociedade, é observada historicamente, por meio do desenvolvimento das ocupações humanas, ocorrendo em sua maioria às margens de fontes hídricas. O volume estimado de água em todo o planeta é de 1.386 milhões de km³, tendo em vista que apenas 2,5% é de água doce e que 0,27% deste percentual é água acessível ao consumo humano, percebe-se que somente 0,0007% do volume total de água está plenamente disponível ao consumo do ser humano (PAZ, 2004). O estudo da água é complexo, e demanda o envolvimento de diversas áreas do conhecimento científico, tendo um caráter multidisciplinar. Apesar de sua complexidade, o estudo hidrológico tem importante papel na geração de informações para a manutenção e melhor preservação dos recursos hídricos.

A bacia hidrográfica possui papel de destaque no estudo hidrológico, para Barrella et al. (2001), ela é compreendida como terras drenadas por um rio e seus afluentes, sendo delimitada pelas regiões mais altas do terreno, de forma que as águas da chuva, infiltre no solo, resultando na formação de nascentes e lençóis freáticos, ou então escoe superficialmente formando rios e riachos, de modo a confluir para um leito único (exutório). Alguns autores enxergam a bacia de forma sistêmica, entendendo como um sistema aberto, recebendo energia por meio de agentes climáticos e perdendo energia através de descarga fluvial (TEODORO *et al*, 2007). De forma resumida, podemos compreender o papel hidrológico da bacia hidrográfica como um reservatório, que transforma a precipitação, entrada de volume concentrada no tempo, em uma saída de volume distribuída no tempo, através do exutório (SILVA, 2013).

Em estudos hidrológicos e ambientais, a escolha entre os termos bacia hidrográfica e região de influência depende do enfoque e da abrangência da análise. O termo Bacia Hidrográfica é utilizado ao se tratar da área drenada pelo rio e seus afluentes (aspectos técnicos e hidrológicos). Por outro lado, a região de influência abrange áreas que, embora não necessariamente inseridas nos limites da bacia, são impactadas pelo rio em aspectos socioeconômicos, ecológicos ou culturais, como atividades agrícolas, pesca, turismo e conflitos pelo uso da água (TUCCI, 2005). Neste trabalho, o termo bacia hidrográfica será utilizado em

contextos técnicos, enquanto região de influência será adotado em abordagens mais amplas, que consideram impactos e interações além da drenagem física do rio.

O manejo da água é um campo multidisciplinar, a grande variedade de alternativas e variáveis existentes no planejamento dos recursos hídricos, considerando seus usos, disponibilidades e preservação, torna necessária a utilização de metodologias que quantifiquem os processos da melhor maneira possível e que gerem alternativas para a melhor tomada de decisão (CARAM, 2010). Nesta perspectiva, modelos complexos de simulação de bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental como ferramentas de gestão e planejamento dos recursos hídricos, podendo auxiliar formuladores de políticas em temas como a gestão do uso da terra e segurança hídrica.

A maneira mais comum de avaliar a disponibilidade hídrica, é realizando a aferição das variáveis hidrológicas com o monitoramento de campo. Porém, essa metodologia encontra dificuldades técnicas e de custo ao se tratar de grandes bacias hidrográficas. O uso da modelagem permite estimar ou prever a resposta do sistema avaliado em relação a eventos futuros, tais como urbanização, desmatamento, modificações em um rio dentre outras ocorrências.

Para a compreensão da dinâmica histórica de ocupação da região do Javaés estado do Tocantins, é necessário evidenciar três etapas desta ocupação territorial, sendo elas: a construção da BR Belém-Brasília, o Movimento Polocentro, que resultou em diversos investimentos, e a própria criação do Estado do Tocantins, que gerou migrações e criações de novos municípios (PBH FORMOSO, 2007). Avaliar o fator histórico é fundamental para compreensão da problemática atual. Para Vergara (2021), as mudanças geradas no uso e cobertura da terra relacionam-se intrinsecamente aos aspectos físicos, tendo em vista que ações antrópicas associadas a esse processo possuem direta relação com a degradação ambiental.

A região de influência do rio Javaés, possui cerca de 12.329,62km², abrangendo os municípios de Sandolândia-TO, Lagoa da Confusão-TO, Pium-TO e a Ilha do Bananal. O rio Javaés é fundamental no desenvolvimento social e econômico da região onde está inserido, visto que a agricultura irrigada é o ponto central da economia da região. Associados a tais fatores, a região de influência do rio Javaés ainda possui importância crucial nos meios bióticos e abióticos, possuindo grandes corredores ecológicos que fornecem deslocamento seguro a várias espécies, abrigando uma riqueza de biodiversidade por toda cobertura vegetal (PBH FORMOSO, 2007). Todas essas importantes características que a região oferece, podem ser impactadas pelas transformações aceleradas e pela falta de regulação no uso do solo.

Dessa forma, destaca-se que o presente estudo espera compreender a relação entre o uso da terra e a disponibilidade hídrica na região de influência do Rio Javaés, mediante registros históricos simulados no modelo SWAT e avaliar cenários propositivos criados a partir do modelo Dinamica EGO. Por fim, discutir os resultados gerando uma integração entre os modelos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A região de influência do rio Javaés, nas últimas décadas, vem apresentando substituição da vegetação nativa por áreas convertidas ao uso agrícola e pecuário. Análises e pesquisas correlatas ao tema de estimativa de vazão, são relevantes aos estudos hidrológicos, tendo em vista que a hidrodinâmica do canal fluvial é impactada pela cobertura da terra, assim como a velocidade e o volume das águas.

Com o uso de modelos hidrológicos, pode-se realizar previsões do cenário de uso e ocupação da terra, bem como as demandas de água. Essas ferramentas permitem avaliar impactos de mudanças climáticas, prever eventos extremos como cheias e secas, planejar a gestão sustentável dos recursos hídricos e identificar áreas prioritárias para conservação. O entendimento atual acerca de sub-bacias permite analisar de forma mais detalhada as dinâmicas hidrológicas em escalas menores, contribuindo para uma gestão mais precisa e adaptada a cada região. Ao integrar dados sobre mudanças de uso e ocupação do solo, é possível projetar o comportamento futuro da bacia. Tais estudos devem auxiliar na tomada de decisões em assuntos de diferentes interesses, como para a agroindústria, gestores públicos, comunidades locais, organizações ambientais (SERRÃO, 2018).

Nesta perspectiva, encontram-se as razões que justificam o estudo da região, visto que as características sazonais da área avaliada evidenciam um sistema hídrico sensível, marcado por uma interdependência complexa entre o rio, o período úmido e os ecossistemas associados. Com os meses mais chuvosos entre outubro e abril e os mais secos de maio a setembro, verifica-se que, enquanto no período chuvoso não há falta de água, o período seco é caracterizado pela pouca disponibilidade hídrica. Nos últimos anos, os níveis críticos de vazão do Rio Javaés e seus afluentes têm sido alvo de debates e até intervenções judiciais, evidenciando os conflitos sociais em torno do uso e da gestão dos recursos hídricos

O Rio Javaés desempenha um papel de destaque tanto no âmbito ambiental quanto socioeconômico na região onde está localizado, sendo fundamental para a manutenção dos ecossistemas locais e para as atividades humanas que dependem de seus recursos hídricos. Portanto, compreender quais os fatores têm influenciado nos níveis de vazão da região e analisar

cenários prognósticos, torna-se relevante para a sociedade, possuindo como intuito, mitigar os eventos extremos que geram perdas, possibilitando assim, a elaboração de mecanismos adequados para o planejamento de ocupação da terra na região.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar a relação entre as mudanças no uso e ocupação da terra na região de influência do rio Javaés e a sua disponibilidade hídrica em cenários propositivos elaborados a partir de modelagem dinâmica.

Objetivos Específicos

- Avaliar os impactos da atividade agrícola no período de 2004 a 2023 pelo modelo hidrológico SWAT.
- Elaborar cenário prognóstico para o ano de 2043, considerando as mudanças de uso e ocupação da terra ocorridas e seus efeitos na disponibilidade hídrica, utilizando o modelo Dinamica EGO.
- Integrar os mapas gerados pelo Dinamica EGO ao modelo SWAT para simular as características hídricas da bacia no cenário prognóstico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns aspectos conceituais dos processos hidrológicos, como ocorrem, suas funções e características. Tratar sobre mudanças no uso e cobertura da terra, avaliando de que forma impactam nos processos hidrológicos e na bacia. Abordar acerca dos modelos de dinâmica de uso e cobertura, SWAT e Dinamica EGO, bem como os parâmetros que influem na análise e observar na literatura como foram utilizados. Por fim discorrer sobre a região e as mudanças de uso da terra ocorridas ao longo dos anos.

2.1 OCUPAÇÃO TERRITORIAL DA REGIÃO DO MÉDIO ARAGUAIA

De acordo com Turner (2005), nos últimos quarenta anos houve um crescente interesse pelo estudo e análise dos impactos gerados pela mudança no uso e cobertura da terra, haja vista as significativas mudanças ambientais observadas em âmbito global, principalmente causadas pelo desmatamento de grandes áreas. Da mesma maneira que é importante compreender as consequências das mudanças no uso e cobertura da terra no meio ambiente, também é fundamental compreender as causas de tais mudanças. Para Turner et al (1995), a compreensão das causas depende de diferentes fatores que interagem dentro de um determinado contexto ambiental, social e histórico, de maneira a conduzir a diferentes usos.

Antes da criação do Estado do Tocantins em 1988, a Bacia do Rio Araguaia já fazia parte da política nacional de desenvolvimento estabelecida no III Plano Nacional de Desenvolvimento (1980-1985). Os principais objetivos eram acelerar o crescimento econômico das regiões menos desenvolvidas, reduzir a pobreza e melhorar a qualidade de vida, descentralizar as decisões de desenvolvimento e criar novos polos fora das áreas metropolitanas para abrigar as populações migrantes.

O Ministério do Interior, em colaboração com a OEA e os governos estaduais de Goiás, Maranhão, Mato Grosso e Pará, desenvolveu o Projeto de Desenvolvimento Integrado da Bacia do Araguaia-Tocantins (Prodiat). O projeto focou no levantamento dos recursos naturais e das condições socioeconômicas para criar planos regionais e programas de desenvolvimento. Enfatizou a gestão integrada dos recursos hídricos, incluindo desenvolvimento energético, agropecuário e hidroviário. Os estudos indicaram potencial para a agricultura irrigada no médio Araguaia, especialmente a leste da ilha do Bananal, nas vastas várzeas planas inundadas na estação chuvosa (VERGARA, 2021).

A implantação de projetos agropecuários durante a “marcha para o oeste,” iniciados na era Vargas e ampliados principalmente no governo de Juscelino Kubitschek (1955-1960) e no

regime militar, mostraram baixa produtividade agrícola na região do médio Araguaia. A pecuária extensiva predominante na região, contribuiu para a grilagem e a concentração de terras. No município de Formoso do Araguaia, a mineração, que se intensificou na segunda metade do século 20, também não trouxe benefícios sociais e econômicos significativos, não conseguindo dinamizar a economia regional ou aumentar a renda e o emprego local. Nessa perspectiva, o governo do estado de Goiás, com a finalidade de fomentar a economia do médio Araguaia, decidiu a implantar o “Projeto Formoso”, fazendo o uso da agricultura irrigada, marcando de forma contundente o início da expansão agrária da região (RODRIGUES, 2013).

Segundo Rodrigues (2013), o governo do Estado de Goiás justificou a importância do Projeto Formoso, precursor do desenvolvimento agrícola na região Médio Araguaia, devido à baixa produtividade agrícola na área em questão, que era predominantemente ocupada pela pecuária extensiva em propriedades grandes, médias e pequenas. Tendo em vista o grande potencial hídrico e a boa qualidade dos solos, especialmente nas planícies aluviais no entorno da Ilha do Bananal, o estado do Goiás considerava uma realidade inadequada o baixo aproveitamento econômico da região.

A implementação do modelo agroindustrial, que se baseia na mecanização, uso de insumos e produtos químicos, aliado ao fato do Projeto Rio Formoso está localizado nas proximidades do Parque Indígena do Araguaia (PIA) e utilizar grandes volumes de água dos rios Formoso e Javaés, resultou em conflitos sociais e territoriais com outros grupos preexistentes na região do médio Araguaia, segundo Rodrigues (2013) estes grupos incluíam principalmente as comunidades indígenas e os camponeses residentes em assentamentos de reforma agrária.

Nesse contexto, verifica-se que a região de estudo envolve diferentes sujeitos sociais, destacando-se os grandes e médios produtores rurais vinculados ao projeto de agricultura Rio formoso, comunidades indígenas Karajá e Javaés residentes da Ilha do Bananal e os camponeses assentados. O histórico da ocupação da região do médio Araguaia evidencia as contínuas transformações do território, que se manifesta por meio de conflitos que afetam diversos aspectos da vida dos grupos sociais envolvidos, tendo em vista que embora esses grupos estejam localizados em uma mesma região, suas diferenças culturais e modos de produção são marcantes e contribuem para essas tensões.

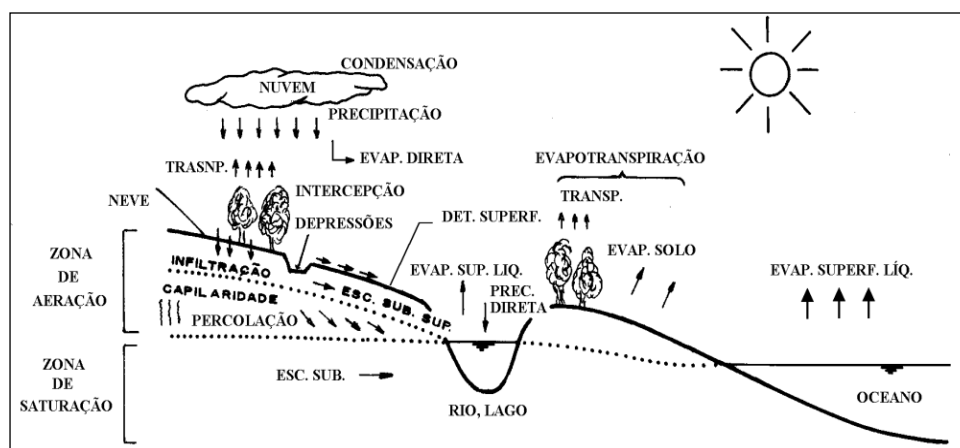
2.2 DESCRIÇÕES DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Conceitualmente o ciclo hidrológico é compreendido como um fenômeno de escala global, onde ocorre a circulação fechada da água entre a superfície da Terra e a atmosfera, possuindo como fator motriz energia solar em associação à gravidade e o movimento de rotação da Terra. Podemos entender que a superfície terrestre engloba tanto continentes, em relação aos solos e rochas, quanto os oceanos. Já a atmosfera possui um espaço delimitado em que a maioria dos fenômenos meteorológicos ocorrem, a denominada troposfera, onde 90% da umidade atmosférica está concentrada, sendo uma camada que varia entre 8 a 16 km. A interação entre a circulação da atmosfera e superfície terrestre ocorre em 2 sentidos: no sentido da superfície terrestre para a atmosfera, sendo resultado dos fenômenos de evaporação e transpiração, e no sentido atmosfera para superfície, que tem como principal agente as precipitações, podendo ocorrer em diferentes estados físicos, chuva, neve, granizo, dentre outros (TUCCI, 2001).

Para Paz (2004), é possível descrever o ciclo hidrológico de maneira simplificada, levando em consideração não haver um começo ou fim de fato, por se tratar de um ciclo, onde a água permanece em constante movimento. Para o autor adota-se, apenas por fins didáticos, o início do ciclo hidrológico na evaporação e formação de vapor d'água. O vapor sob a influência de certas condições precipita de variadas formas (chuva, neve, dentre outros), uma parcela desta precipitação evapora, não chegando à superfície terrestre e parte da precipitação também atinge diretamente oceanos, rios e lagos.

Nesse contexto, a parcela que cai na superfície terrestre, está sujeita a interceptação da cobertura vegetal, na qual parte evapora e parte chega até o solo. A água que chega ao solo pode escoar de três maneiras distintas: a primeira maneira ocorre quando a água infiltra sub-superficialmente, sendo denominado escoamento sub-superficial; a segunda maneira ocorre nos casos em que há infiltração e a água percola até aquíferos, este escoamento é mais lento, sendo chamado escoamento subterrâneo; e, por fim, a terceira maneira de ocorrência é o escoamento superficial, em que a água alcança os corpos hídricos, seja por escoamento superficial, sub-superficial, subterrâneo, ou mesmo precipitação direta, influenciada pela gravidade e segue para lagos e oceanos (PAZ, 2004). A figura 1 descreve visualmente a ocorrência do ciclo hidrológico.

Figura 1: Ciclo Hidrológico.



Fonte: Modificado de TUCCI (2001).

Segundo Tucci (2001) só é possível considerar o ciclo hidrológico como um ciclo fechado em nível global, pois à medida que reduzimos a área de observação, fica evidente que o ciclo hidrológico é aberto em nível local, tendo em vista que determinado volume de água evaporado, não precipita necessariamente no mesmo local de sua evaporação. Isso devido a movimentação da água, que está continuamente ativa, passando por diferentes dinâmicas tanto na atmosfera quanto na superfície terrestre.

Dentro do interesse mais restrito da hidrologia destaca-se, como já foi mencionado, a chamada “parte terrestre do ciclo hidrológico”, onde a atmosfera e os oceanos (ou outros destinos da água escoada) são substituídos por condições de contorno adequadas. A principal vantagem desse método é que se pode voltar a atenção para uma extensão limitada da terra, “uma bacia hidrográfica”, que constitui a unidade espacial natural da hidrologia. (SANTOS et al. 2001).

A compreensão do comportamento hidrológico de uma determinada bacia, seja após ação humana ou em sua condição original, depende do estudo da relação entre precipitação e vazão da bacia. A análise resulta do estabelecimento de relações quantitativas entre os processos hidrológicos no ciclo hidrológico, sendo necessário que o monitoramento e modelagem numérica ocorram juntos (CARAM, 2010).

2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos são formulações matemáticas que têm como finalidade representar o comportamento de uma bacia hidrográfica. Com a utilização de equações, esses

modelos buscam descrever os processos hidrológicos, seja em relação a uma variável isolada ou um conjunto de variáveis do ciclo hidrológico. Tucci (1997) descreve o modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica, com uma linguagem simplificada e de melhor uso, cuja finalidade é encontrar respostas para diversas entradas. Dessa forma, os modelos são valiosas ferramentas utilizadas no âmbito de estudos ambientais auxiliando na gestão eficiente dos recursos hídricos.

Porém a simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que resulta no surgimento de diferentes modelos, para o atendimento dos diversos processos e propósitos existentes na bacia, ou seja, quanto mais complexo for o sistema, mais necessário torna-se o modelo. Em relação a bacia hidrográfica, a modelagem visa primordialmente entender seu comportamento para utilizar seus recursos e proteger suas características (PAZ, 2004).

A modelagem hidrológica tem evoluído, sempre visando a melhora nas análises e torná-las eficientes, a integração dos modelos hidrológicos com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) proporciona uma grande variedade de vantagens nas análises de bacia hidrográfica. Possibilita a operação de variadas análises tais como, dimensionamento da bacia, calibração, simulação de processos e cenários e a comparação de resultados com outros modelos (SILVA, 2013).

Algumas metodologias de integração entre os modelos hidrológicos e o SIG vêm sendo aplicadas a depender do objetivo do estudo. Coelho (2006) relacionando o SIG com modelo chuva-vazão, com a finalidade de simular o escoamento e de produção de sedimentos em microbacias, desenvolveu uma metodologia de integração baseada nos modelos hidrológicos distribuídos e planos de informação no formato raster.

2.3.1 Modelo SWAT

Com origem nos Estados Unidos da América, o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi desenvolvido em 1996 pelo Dr. Jeff Arnold e sua equipe no Agricultural Research Service no Texas A&M University. Tendo por finalidade primária auxiliar os gestores de recursos hídricos a avaliar o impacto da gestão no abastecimento de água e na poluição de fontes difusas em bacias hidrográficas (ARNOLD et al., 1998). O presente trabalho adotou a interface do ArcMap para desenvolvimento da simulação, sendo escolhida a versão ARCSWAT 10.5.24.

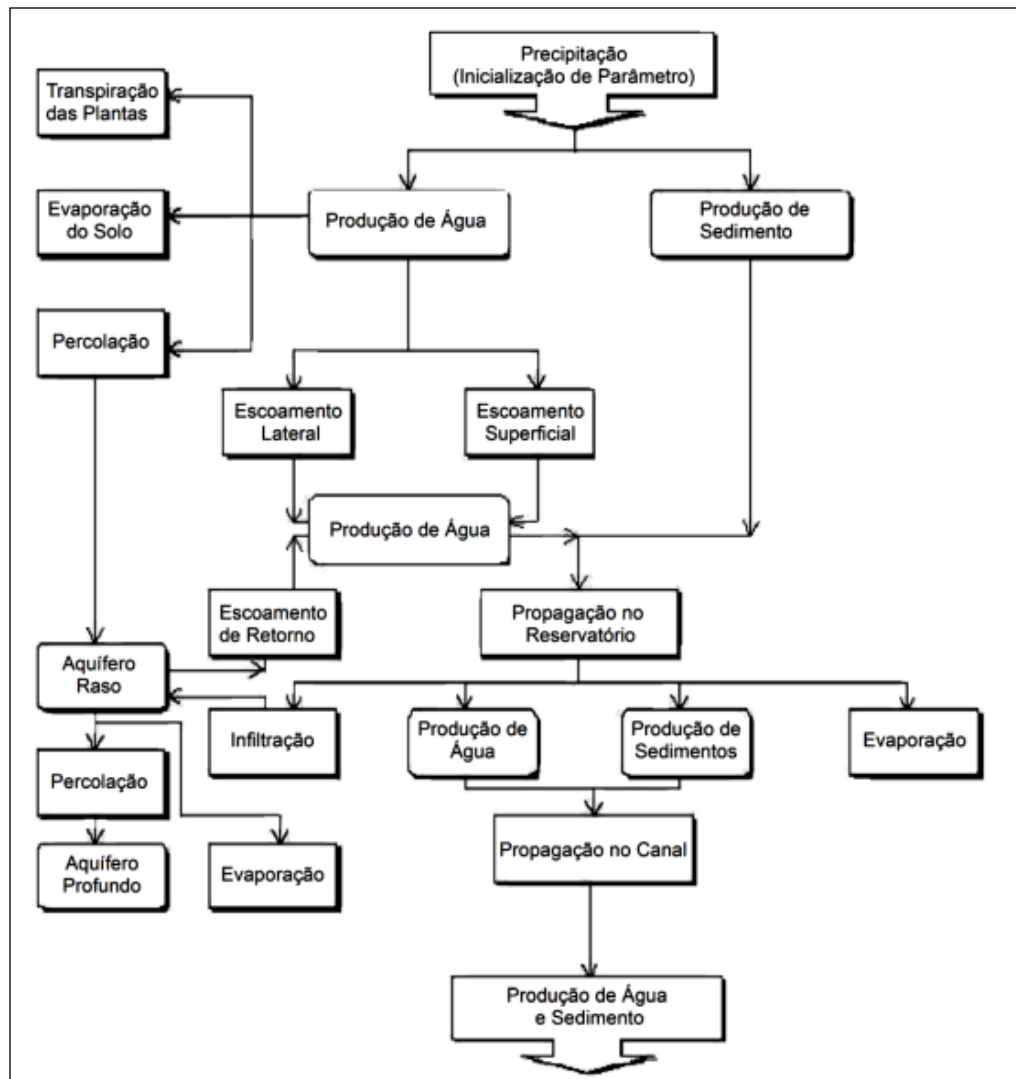
Segundo Neitsch et al. (2005) o modelo SWAT é um modelo de base física computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações contínuas de longa duração. As capacidades deste modelo são as mais variadas, dentre elas estão: simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e bactérias, práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água.

O modelo SWAT é consolidado em âmbito mundial como uma eficiente ferramenta na previsão de impactos resultantes de alterações no uso e ocupação da terra. Sua popularidade foi verificada por Fu et al. (2019), que ao adicionar 42 modelos hidrológicos no campo de busca da plataforma Scopus, observaram que 44% dos artigos publicados entre 2003 e 2018 abordavam o modelo SWAT.

2.3.2 Parâmetros do modelo SWAT que influem na análise de mudanças do uso e cobertura da terra

Segundo Silva (2014) abordado por Serrão (2018), o modelo hidrológico SWAT vislumbra a simulação de variados processos físicos, sendo executado com o uso de dois componentes: escoamento superficial (fase de água), erosão e transporte de sedimentos (fase de sedimentos). O modelo SWAT na sua fase terrestre se divide em sete módulos: clima, hidrologia, cobertura vegetal/crescimento de plantas, erosão, nutrientes, pesticidas e práticas de manejo (Serrão, 2018). A Figura 2 representa o diagrama da sequência dos processos no modelo SWAT.

Figura 2: Fluxograma das equações no modelo SWAT



Fonte: Adaptado de King et al. (1996)

A validade do modelo como ferramenta de análise das consequências das mudanças do uso e cobertura da terra depende da determinação de valores confiáveis para os parâmetros adotados. Neste sentido é importante analisar a incerteza envolvida na determinação de cada um de tais parâmetros (CARAM, 2010).

2.3.2.1 Processos Hidrológicos

A equação de balanço hídrico número (1), é utilizada pelo modelo SWAT para simulação da produção de águas superficiais. No qual o valor de SW_t representa o valor final de água no solo em (mm); SW_0 representa o valor inicial de água no solo em (mm); “ t ” é o tempo em (dias); “ P ” é a quantidade de precipitação em um dia (mm); Q_{sup} é a quantidade de escoamento superficial em um dia (mm); ET é a quantidade de evapotranspiração em um dia

(mm); W_a é a quantidade de água na zona não saturada proveniente do perfil do solo, chamada de percolação, medida em um dia (mm) e Q_{sub} é o escoamento de base em um dia, chamado de fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm) (SILVA, 2013; SERRÃO, 2018).

- $$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_{sup_i} - ET_i - W_{a_i} - Q_{sub_i}) \quad (1)$$

Portanto, o modelo SWAT obtém a quantidade de água no solo por meio da equação (1), que depende de cinco variáveis e dos dados de precipitação inseridos pelo usuário.

A subdivisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU, do inglês hydrologic response units) possibilita uma análise mais detalhada das diferenças de evapotranspiração, e outras componentes do ciclo hidrológico para os diferentes tipos de usos e características do solo. O escoamento superficial é medido para cada HRU e, em seguida, é quantificado o total para a bacia inteira, melhorando a análise do balanço hídrico da bacia (SERRÃO, 2018).

2.3.2.2 Escoamento Superficial

O valor estimado pelo SWAT para escoamento superficial, é baseado no Método da Curva Número (CN) (equações 2 e 3) elaborado em 1954 pelo do Soil Conservation Service (SCS), ou no método de Infiltração de Green & Ampt. O Método da Curva Número é o mais utilizado nos projetos de simulação hidrológica pelo SWAT, devido ao seu bom desempenho visto em diversos trabalhos como Serrão (2018) e Silva (2013).

- $$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \quad P > 0,2 S \quad (2)$$

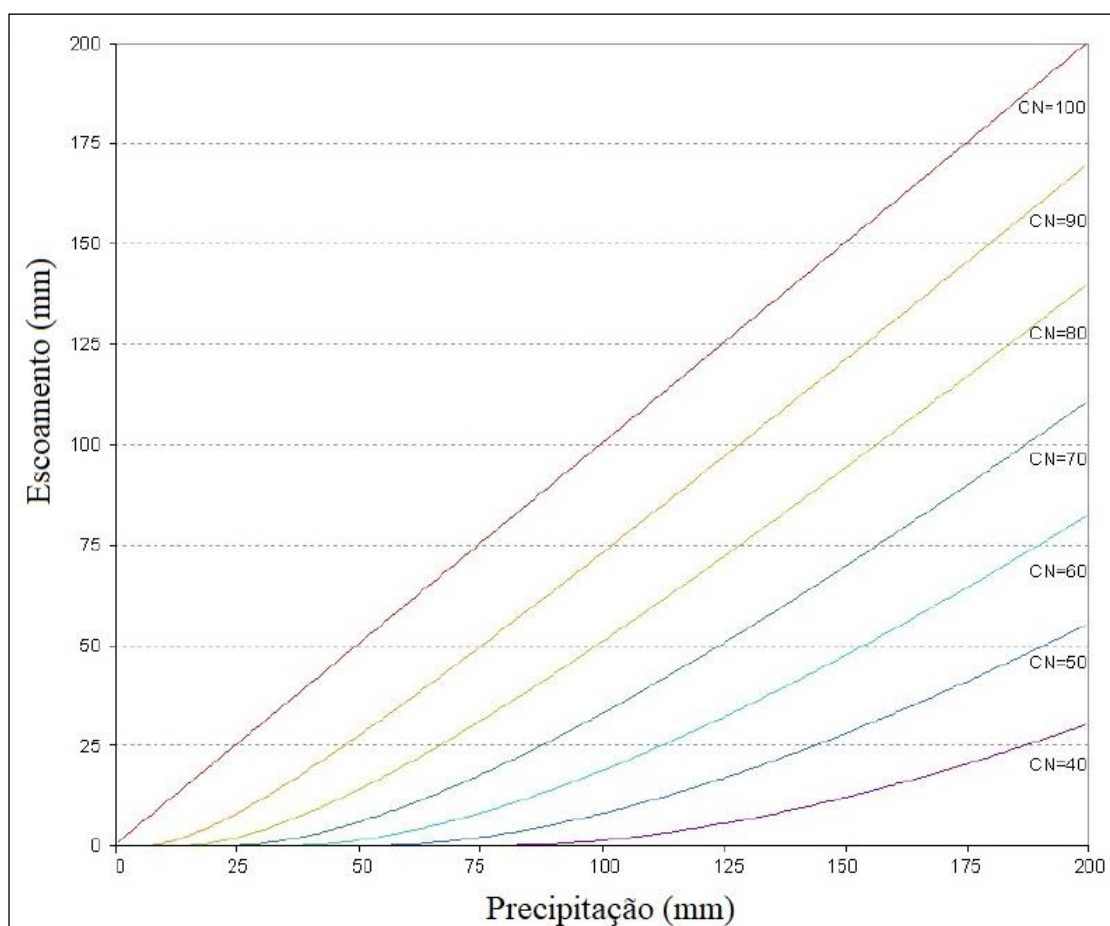
- $$Q_{sup} = 0, \quad P \leq 0,2 S \quad (3)$$

- $$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

O valor de Q_{sup} representa o escoamento superficial diário medido em (mm), “P” é atribuído a precipitação pluvial diária dada em (mm) e “S” é o parâmetro de retenção. A equação (4) descreve o parâmetro de retenção (S), que depende do uso e tipo do solo, manejo, declividade do solo, permeabilidade, além de depender da variação da quantidade de água no solo.

Segundo Neitsch (2005), a finalidade desta metodologia está em fornecer uma estimativa do escoamento superficial para uma variada gama de uso e ocupação da terra e de tipo de solo. Nesse contexto, observa-se a importância do Método da Curva Número na avaliação do escoamento superficial. Este parâmetro está relacionado com as características do solo, condições de umidade antecedente e com o uso e cobertura. No modelo SWAT o fator CN foi determinado de maneira diária, em que seu valor numérico varia no intervalo de 1 a 100, o valor 1 representa um solo totalmente permeável e 100 um solo impermeável, que converterá toda precipitação em escoamento. A Figura 3 demonstra a relação entre a precipitação e escoamento pelo método CN no SWAT.

Figura 3: Relação entre precipitação e escoamento no método CN.



Fonte: Modificado de NEITSCH et al., 2009

2.3.2.3 Evapotranspiração:

O modelo SWAT disponibiliza ao menos três métodos de cálculo da evapotranspiração sendo eles: Penman-Monteith, o método de Priestley-Taylor e o método de Hargreaves (NEITSCH et al., 2009). A equação número (5) demonstra o cálculo da evapotranspiração por meio do método Penman-Monteith, esse método é o mais adotado devido sua demanda de variáveis de mais fácil disponibilidade, sendo elas: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, sendo este método o mais recomendado no âmbito acadêmico (SILVA, 2013).

$$\bullet \quad ETP = \frac{0,48 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (5)$$

As variáveis são as seguintes: Rn representa o saldo de radiação ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); “G” é o fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); Ta é Temperatura média do ar ($^{\circ}C$); u2 é velocidade média diária do vento a 2m de altura; es é a pressão de saturação de vapor média diária (kPa); ea descreve a pressão atual de vapor média diária (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor; γ é a constante psicrométrica ($kPa/^{\circ}C$) (SERRÃO, 2018).

2.3.2.4 Escoamento Lateral:

O escoamento lateral é descrito por Serrão (2018), como o momento em que a água que percolou no solo, encontra uma camada impermeável, ocorrendo o acúmulo da água e por consequência a saturação da região, o que resulta no escoamento lateral no sentido da declividade do solo, representado na equação (6).

$$\bullet \quad Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 \cdot SWly_{excess} \cdot K_{sat} \cdot S_{lp}}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (6)$$

O valor de Qlat representa descarga hídrica da rampa de saída, sendo o valor do escoamento subsuperficial medido em (mm/dia); SWlyexcess é o volume drenável de água armazenada na zona saturada do solo dado em (mm); Ksat é a condutividade hidráulica saturada (mm/h); Slp é a declividade da rampa ($m.m^{-1}$); ϕ_d é a porosidade drenável da camada de solo (mm/mm); Lhill é o comprimento da rampa (m). Este modelo de escoamento lateral adotado

pelo SWAT, é o de armazenamento cinemático, baseado na equação de balanço de massa líquida.

2.3.2.5 Produção de Sedimentos:

O modelo SWAT também avalia a erodibilidade dos solos, fator esse que representa suscetibilidade do solo ao processo erosivo e produção de sedimentos, com o uso da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS) descrita pela equação (7).

$$\bullet \quad \text{Sed} = 11,8 \left(Q_{\text{sup}} + Q_{\text{pico}} + \text{ÁREA}_{\text{HRU}} \right)^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times \text{CFRG} \quad (7)$$

No qual Sed representa a quantidade de produção de sedimentos após a ocorrência de uma chuva, valor medido em (T); a variável Q_{sup} é o escoamento superficial em (mm); Q_{pico} é a vazão de pico do escoamento (m^3/s); ÁREA_{HRU} é o valor área da Unidade de Resposta Hidrológica medida em (ha); O fator “K” é o valor de erodibilidade do solo [$(0,013\text{ton m}^2 \text{hr})/(\text{m}^3 \text{ton cm})$]; “C” representa o fator de uso e manejo do solo (adimensional); LS é o fator topográfico (adimensional); “P” é o fator das práticas conservacionistas (adimensional), e CFRG o fator de fragmentação esparsa (adimensional).

A literatura aponta que a vegetação nativa e principalmente as matas ciliares, desempenham papel fundamental na retenção de sedimentos. Santos e Sparovek (2011) avaliaram a eficiência de uma mata ciliar na retenção dos sedimentos produzidos na área de lavoura cultivada com algodão, em sistema de plantio convencional e verificaram a eficácia da cobertura vegetal na retenção dos sedimentos advindos da área de lavoura.

2.3.3 Modelo Dinamica EGO

Desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, o modelo Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objects) foi criado como um software genérico de modelagem de mudanças ambientais (RODRIGUES et al., 2007). É um modelo de dinâmica espacial, que permite a simulação baseado em autômatos celulares, possui algoritmos de transição por evidência. A matriz de transição permite o cálculo das probabilidades de transição, possibilitando a simulação de cenários futuros e passados. O ambiente de software é escrito nas linguagens de programação C++ e Java (SOARES-FILHO et al., 2002).

Suas aplicações tem sido as mais diversas, Troupin & Carmel (2016) utilizando o Dinamica EGO, simularam o desenvolvimento urbano da região mediterrânea de Israel, de duas formas, com um desenvolvimento urbano regulamentado e outra simulação com desenvolvimento não regulamentado para o período de 1998 e 2007. Como resultado os autores observaram que o cenário regulamentado foi mais favorável à conservação ambiental.

O Dinamica EGO apresenta uma estrutura metodológica que se divide em três etapas principais, sendo: preparação e calibração do modelo, simulação de transições e análise e validação dos resultados. Na primeira etapa, de preparação, são inseridos dados espaciais históricos de uso e cobertura da terra, além de variáveis explicativas como a existência de infraestruturas e características ambientais, que servem de base para a calibração por meio de regressão logística, dessa forma é calculada as probabilidades de transição entre diferentes classes de uso da terra (SOARES-FILHO; et al., 2002). Na simulação de transições, o modelo utiliza autômatos celulares estocásticos para prever mudanças no uso da terra em escalas temporais futuras, considerando tanto fatores locais quanto a influência espacial das células vizinhas, com transições definidas estocasticamente (SOARES-FILHO et al., 2013). Na etapa de análise e validação, os resultados simulados são comparados com dados reais para avaliar a acurácia do modelo, permitindo ajustes nos parâmetros e posterior aplicação para a simulação de cenários futuros.

A etapa de preparação e calibração do modelo Dinamica EGO envolve a coleta de dados espaciais históricos sobre o uso e cobertura da terra, incluindo classes como áreas urbanas e agrícolas, além de variáveis explicativas que influenciam as transições, como proximidade de estradas e declividade (SOARES-FILHO et al., 2013). É necessário incluir os mapas de uso e cobertura da terra inicial e final, sendo que o mapa inicial fornece uma representação do estado da cobertura da terra antes das mudanças, enquanto o mapa final indica o estado após as transições. A calibração é realizada por regressão logística, que determina as probabilidades de transição entre as classes de uso da terra com base nas variáveis inseridas, permitindo identificar os fatores mais relevantes nas mudanças observadas, a equação 8 demonstra esse processo (SOARES-FILHO et al., 2002).

$$\bullet P_{(i \rightarrow j(x,y)/V)} = \frac{e^{G_{i \rightarrow j}(V)}}{1 + e^{G_{i \rightarrow j}(V)} + e^{G_{i \rightarrow 2}(V)} \dots + e^{G_{i \rightarrow n}(V)}} \quad (8)$$

Em que “V” é um vetor das “k” variáveis espaciais, medidas no local (x,y) e representadas

por $V_{1xy}, V_{2xy}, \dots, V_{kxy}$, e cada $G_i \rightarrow j(V)$ é calculado pela seguinte equação:

$$\bullet \quad G_{ij}(V) = \beta_{0,ij} + \beta_{1,ij}V_{1,xy} + \dots + \beta_{k,ij}V_{k,xy} \quad (9)$$

Dessa forma se utiliza da regressão logística para estimar os coeficientes das equações $G_{ij}(V)$, e conseqüentemente a influência de cada variável selecionada nas transições. Este modelo prioriza a análise das chances de uma célula mudar para um novo estado ou permanecer inalterada. O resultado desse procedimento é a geração de mapas que representam as probabilidades de transição com base na condição atual da célula. Esses mapas probabilísticos são posteriormente empregados por funções de transição, denominadas *Expander* e *Patcher*, que facilitam a aplicação dessas probabilidades nas simulações do modelo, permitindo uma análise mais robusta das dinâmicas espaciais em questão (SOARES-FILHO et al., 2002).

A matriz de transição descreve as probabilidades de mudança de estados em um sistema ao longo do tempo. Cada elemento da matriz indica a probabilidade de uma célula transitar de um estado i para um estado j . A matriz de transição T é uma matriz quadrada, onde cada linha e coluna representa um estado possível do sistema. Assim, para um sistema com “ n ” estados, a matriz terá dimensões “ $n \times n$ ”.

$$T = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Em que P_{ij} é a probabilidade de uma célula no estado “ i ” mudar para o estado “ j ”.

2.3.4 Aplicações dos modelos SWAT e Dinamica EGO

Utilizando o modelo SWAT o estudo de Temtime et al. (2023), foi desenvolvido objetivando avaliar os impactos causados pelas mudanças no uso da terra na bacia do rio Robigumero, localizado na Etiópia. Como resultado, foi verificado o aumento da região agricultável e redução na área florestada entre os anos de 1996 e 2016. A área agrícola aumentou cerca de 22.4% enquanto a área florestal diminuiu 5.13%, fruto do aumento populacional e demanda por alimentos. Em relação a precisão e validação da simulação feita pelo SWAT, os autores obtiveram bons valores de concordância entre as vazões observadas e as simuladas com coeficientes de: NSE de 0,86 e R^2 0,87. O estudo simulou três cenários sendo os anos de 1996, 2006 e 2016. A simulação mostrou que o impacto da alteração do uso da terra entre 1996 e 2006 resultou no aumento da vazão média mensal de 27,9% nos meses úmidos e diminuiu em 1,9%

nos meses secos. Enquanto de 2006 para 2016, houve aumento na vazão média mensal de 16,2% nos meses chuvosos e de 0,4% nos secos. Os autores atribuíram os resultados principalmente à conversão da cobertura florestal em terras agrícolas.

Belihu et al. (2020), avaliou o rio da Bacia Hidrográfica de Gidabo superior na Etiópia, com a finalidade de verificar os impactos das alterações no uso do solo nesta bacia. Os autores simularam três cenários com os mapas de uso de 1985, 2000 e 2018, os mapas foram selecionados seguindo o processo de classificação supervisionada. Os resultados expressaram que entre os anos de 1985 e 2018, houve um grande crescimento de 59,8% de terra agricultável e 28,7 % de área urbana, em contra ponto houve redução de 31,6% de florestas e 63,4% de pastagens. A calibração do modelo foi feita com dados dos anos de 1987 a 2000 com um período de aquecimento de três anos, o resultado da calibração verificou que a simulação obteve boa concordância com os valores observados. Foram utilizados os coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinação (R^2), PBIAS e RSR. A simulação mostrou que entre 1985 e 2018 houve um aumento no escoamento superficial de 9,2% e na evapotranspiração em 1,7%. Segundo os autores esse resultado é fruto da expansão agrícola e urbana. A perda de floresta está relacionada com a diminuição da infiltração, aumentando o fluxo superficial na estação chuvosa e diminuindo na estação seca.

Ao analisar o estudo de González et al. (2021), que objetiva avaliar a variação espacial e temporal histórica do desmatamento no território colombiano na última década e propor projeções de desmatamento para os anos de 2030 e 2050. Verifica-se que o estudo utilizou a plataforma Dinamica EGO para a análise do desmatamento. Para a elaboração dos cenários preditivos de 2030 e 2050, levou-se em consideração as tendências históricas (considerando a taxa do desmatamento constante) e o cenário de governança (em que há redução na taxa de desmatamento). No cenário que leva em consideração as tendências históricas de desmatamento, a perda florestal entre os anos de 2018 a 2050 seria de 65.479 km². Já no cenário de governança, em que há um esforço político para redução do desmatamento, a perda florestal é significativamente inferior de 26.982 km². Essa simulação procurou identificar futuras trajetórias do desmatamento e suas influências regionais dos vetores de perda florestal, visando ser útil no desenvolvimento de políticas e estratégias nacionais para minorar os prejuízos advindos da degradação ambiental.

Utilizando o modelo Dinamica EGO Mendoza et al. (2021), buscou avaliar alternativas para minimizar os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica de Usumacinta, compreendida entre os territórios mexicano e guatemalteco, em relação as trajetórias socioeconômicas. Foram elaborados três cenários, um cenário que segue as

tendências históricas da região (BAU), outro cenário que leva em consideração a redução do desmatamento e degradação (REDD+) e um último cenário de desmatamento zero a partir de 2030 com base em compromissos internacionais. Os resultados obtidos pela matriz de transição demonstram que entre os anos de 2005 e 2012 a taxa anual de desmatamento foi de 3,3%. A simulação demonstrou que até 2050 no cenário BAU a cobertura natural da terra pode reduzir em até 22,3%, já no cenário REDD+ a redução seria de 12,2%. Em contra partida, no cenário desmatamento 0 a partir de 2030, seria possível evitar a destruição de 22,4% da bacia hidrográfica florestada e ainda recuperar 5,9% dela.

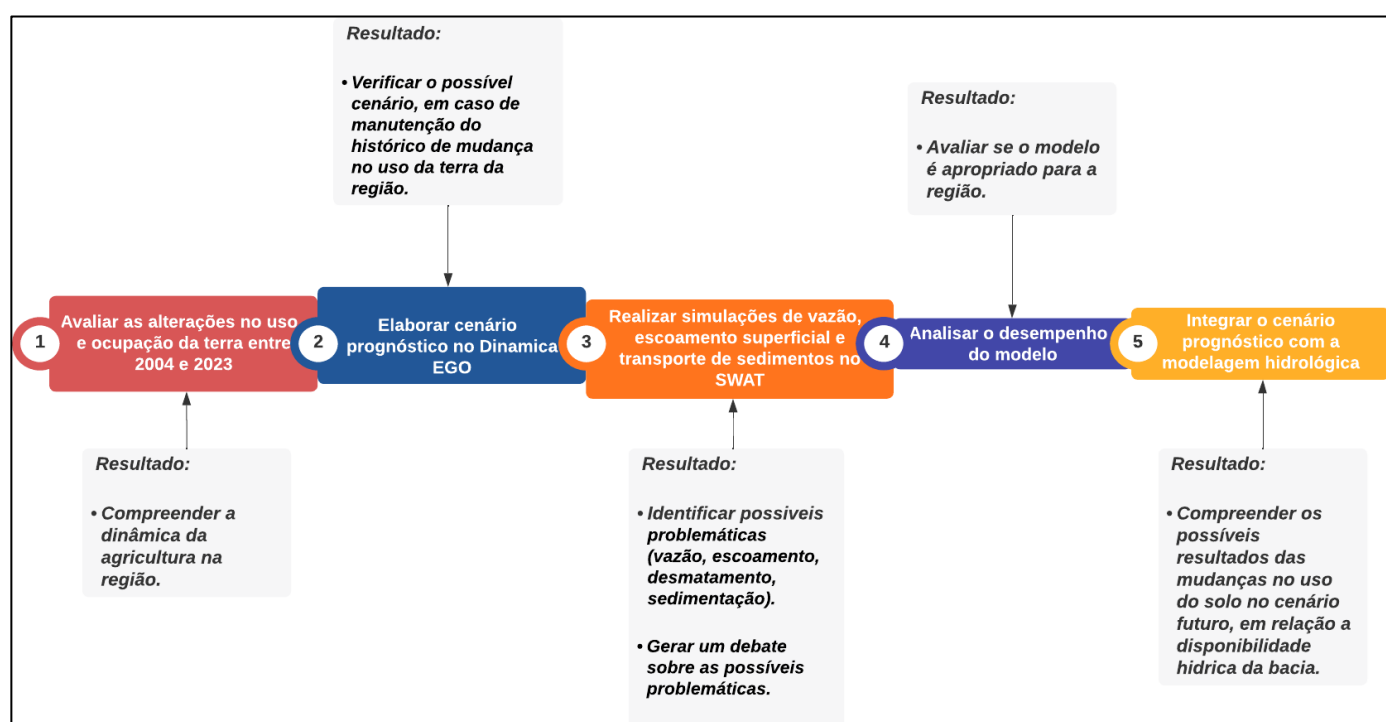
O modelo Dinamica EGO também foi utilizado por Pisani et al. (2016), para avaliar as mudanças no uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara município de Botucatu - SP, Brasil. Utilizando os mapas de uso e cobertura da terra dos anos 1988, 1997 e 2007, foi simulado um cenário de uso e cobertura para o ano de 2017, como resultado os autores observaram a substituição de áreas de pastagem por silvicultura até o ano de 2007, sendo que em 2017 a área de mata nativa tornou-se inferior a área de silvicultura. Os autores concluíram que o Dinamica EGO tem o potencial de auxiliar fortemente no monitoramento das mudanças do uso e cobertura da terra no contexto da sub-bacia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente tópico fará a descrição e caracterização da área de estudo, observando aspectos climáticos, geográficos e de uso da terra. Abordará sobre os dados a serem utilizados no estudo, bem como a metodologia seguida pelo modelo SWAT e dinâmica EGO na simulação da região avaliada.

3.1 SEQUÊNCIA METODOLÓGICA

Figura 4: Fluxograma metodológico.

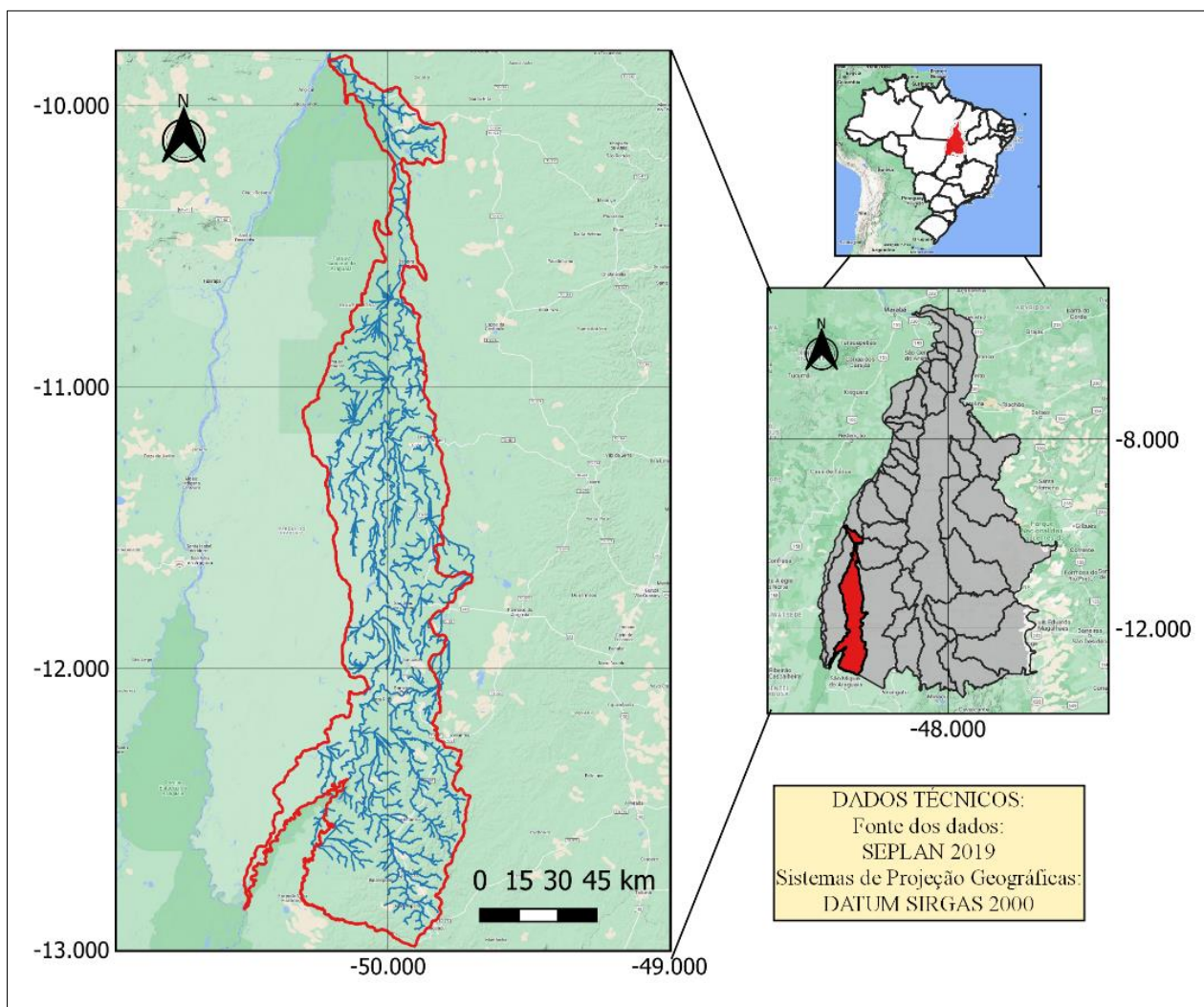


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 ÁREA DE ESTUDO

O rio Javaés é também denominado como braço menor do Araguaia, sua região de influência encontra-se na porção média da planície aluvial da bacia do Araguaia entre as coordenadas -12° 54' 39,5 S e -50° 08' 39,5" W ao sul, e ao norte -09° 50' 32,3"S -50° 12' 17,3" W, possuindo uma área de drenagem de 12.329,62km², o que equivale à cerca de 4,4% da área total do Estado do Tocantins e 3,2% da bacia do rio Araguaia, se estendendo por aproximadamente 385 km. (BARBOSA, 2019)

Figura 5: Localização da Bacia do rio Javaés no Estado do Tocantins.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2022).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

- **Relevo**

A área da bacia do rio Javaés é constituída basicamente por terras de planície aluvial contornadas por terras altas desenvolvidas sobre rochas do embasamento pré-cambriano. A ampla planície aluvial que compõe a bacia, é composta predominantemente por solos de sedimentos argilo-arenosos depositados pelo rio Javaés e seus principais afluentes. Em decorrência das condições topográficas e do regime hídrico estacional, ocorre o encharcamento dos solos durante certo período do ano. Nas regiões de planície o solo dominante é da classe plintossolos, associados a cambissolos e solos aluviais. (SEPLAN, 1995)

Figura 6: Planície aluvial que compõe o relevo.



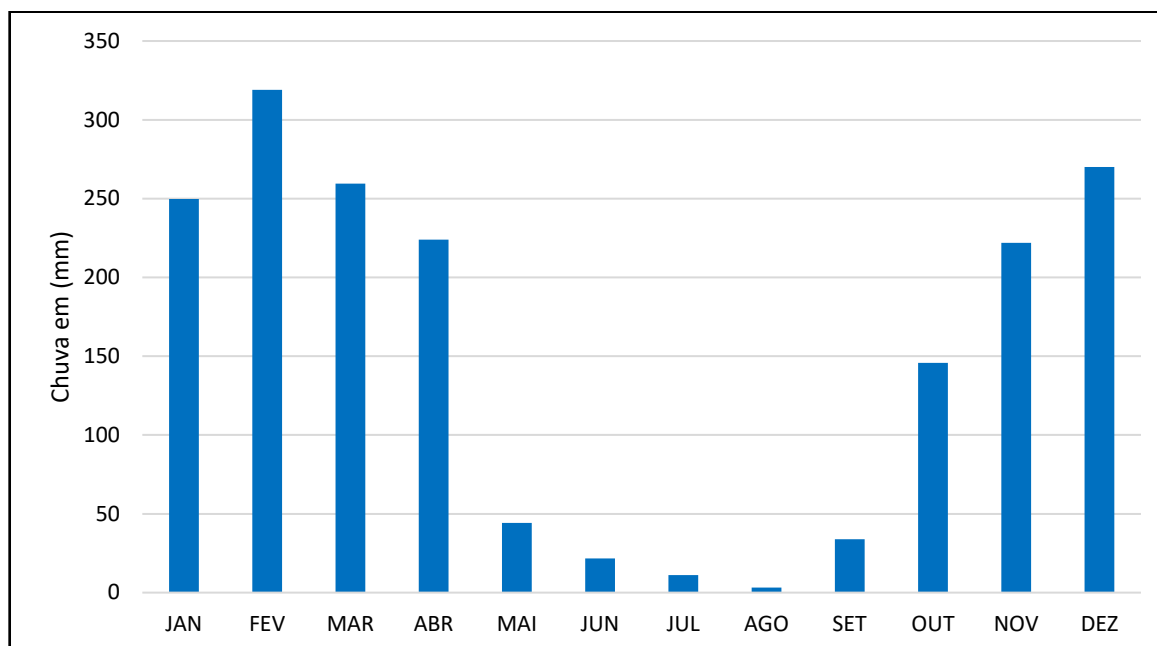
Fonte: Lorrán Michael de P. Macedo (2020)

As planícies aluviais que compõem grande parte da região, possuem relevo predominantemente plano e declividades menores à 0,5% no sentido sul para norte, a altitude média varia no entorno de 200m. Na região de planície observa-se a ocorrência de pequenas depressões que constituem lagoas temporárias. As margens dos principais cursos hídricos possuem relevo suave ondulado, característico de áreas de deposição fluvial recente. Na região mais elevada (terras altas), que circundam a planícies fluvial, o relevo é ondulado e suave ondulado, com formação de encostas de declividade geralmente maior que 8%. (SEPLAN, 1995)

- **Clima**

Observando a classificação de Köppen, o clima da região da bacia do Javaés pode ser classificado como tipo AW. Sendo que o período seco está contido entre os meses de junho-agosto, mesmo que a precipitação seja relativamente superior à média de outras latitudes tipicamente tropicais. O mês mais seco está contido no trimestre de junho-agosto, já o mês mais chuvoso oscila entre janeiro e fevereiro, com um trimestre úmido abrangendo de janeiro a março, como ilustra o hidrograma da Figura 7. As precipitações médias anuais são superiores a 1600mm.

Figura 7: Precipitação média mensal do rio Javaés estação de Barreira da Cruz (2005-2024).



Fonte: GAN-IAC (2005-2024) Elaborado pelo autor (2024).

Um dos fatores mais preponderantes na formação de solo na região de planícies aluviais, são justamente as características climáticas, em especial a pluviosidade, que dão origem a solos hidromórficos como consequência de períodos alternados de excesso de umidade e seca. No tocante a distribuição de chuvas ao longo do ano, percebe-se que o período de maio a setembro, apresenta escassez de precipitações, ocorrendo em média cerca de 5% a 7% das chuvas anuais. O maior volume de precipitações está no período de outubro a abril, em que os 93% a 95% restantes de precipitação ocorrem (SEPLAN, 1995).

SEPLAN (2012) classifica o clima da região como tropical, quente, sub úmido, com temperaturas máximas de 38° C nos meses de agosto a setembro e mínimas de 22 °C em julho, com média anual de 27° C. Dados de insolação apontam que o valor médio anual da bacia é de 2.500 horas, correspondendo a 210 dias ou 7 meses contínuos com luz solar direta. No que tange a umidade relativa, foi observado grande variação nos valores mensais, sendo relativamente altos nos meses úmidos, oscilando entre 85% a 90%, com drástica diminuição nos meses secos, com valores da ordem de 55% a 65% de umidade relativa. Os ventos na região da bacia do Javaés são fracos, a velocidade média anual dos ventos é aproximadamente de 1,27m/s. Observações sobre evaporação realizadas por evaporímetros de Piche, ponderam que a evaporação média anual é de cerca de 1700 mm.

- **Vegetação**

A região da bacia do Javaés abrange uma área de transição entre importantes ecossistemas do cerrado e da floresta amazônica, sendo constituída por vegetação mesclada, ocorrendo alternância entre amplas áreas de vegetação típica do cerrado, florestas e campos com gramíneas. As formações de vegetação são: Floresta aluvial, floresta de galeria, floresta hidrófila, cerrado, cerrado parque, savana gramíneo-lenhosa (SEPLAN, 1995).

Ao longo das últimas décadas, grandes áreas em especial do cerrado e cerrado parque tem sofrido a substituição da vegetação nativa por áreas lavradas para agricultura, visando a implantação de culturas principalmente de arroz e pastagens, que associado ao advento das queimadas, frequentes no período da seca, contribuem para modificação drástica na vegetação nativa.

Figura 8: Trecho do rio Javaés – Mata Ciliar.



Fonte: Lorrán Michael de P. Macedo (2020)

- **Solos**

Estudos pedológicos na região da bacia do Javaés apontam que a planície aluvial é composta por: plintossolo, cambissolo plíntico, solos aluviais e glei pouco húmico. As terras altas são compostas basicamente por plintossolo concrecionário e latossolos.

A região de planícies aluviais é dominada por Plintossolos, ocupando mais de 50% do território, sendo o material de formação de sedimentos aluviais. Os Cambissolos são originados de sedimentos aluviais e ocorrem em geral entre os combros ¹ dos rios e a planícies de inundação, são profundos e moderadamente profundos, relevo plano ou suavemente ondulado, com drenagem variando de moderada a imperfeita, solos de boas características para uso agrícola, embora sujeitos ao risco de inundação. Os Solos Aluviais ocupam a região de combros nas margens do rio Javaés, apresentando topografias suave ondulado, possuindo textura variada sendo comum a formação de bancos de areia, são solos melhor drenados devido suas cotas superiores às planícies fluviais. Os solos Gleí Pouco Húmico, ocupam áreas menores sobre terrenos com relevo plano ou sub côncavo, em geral estão localizados em terrenos que circundam as depressões e lagoas (SEPLAN, 1995).

As terras altas que contornam a planície aluvial, são regiões dominadas por Plintossolo Concrecionário, apresentando concreções lateríticas em todo o perfil, são solos rasos e com drenagem variando de moderado a bem drenado, o relevo geral é ondulado, suas características não são atraentes para a produção agrícola. Associado a estes solos observa-se a ocorrência de pequenas áreas de solos mais profundos da classe Podzólico. Com exceção dos solos concrecionários que são os dominantes na região, os demais solos são interessantes para o uso agrícola desde que não se faça o uso de irrigação, pois são inaptos por limitações topográficas (SEPLAN, 1995).

¹ Pequena elevação isolada de terreno. Combro é sinônimo de talude, cemba e cômaro.

Figura 9: Trecho do rio Javaés – Solos das margens.

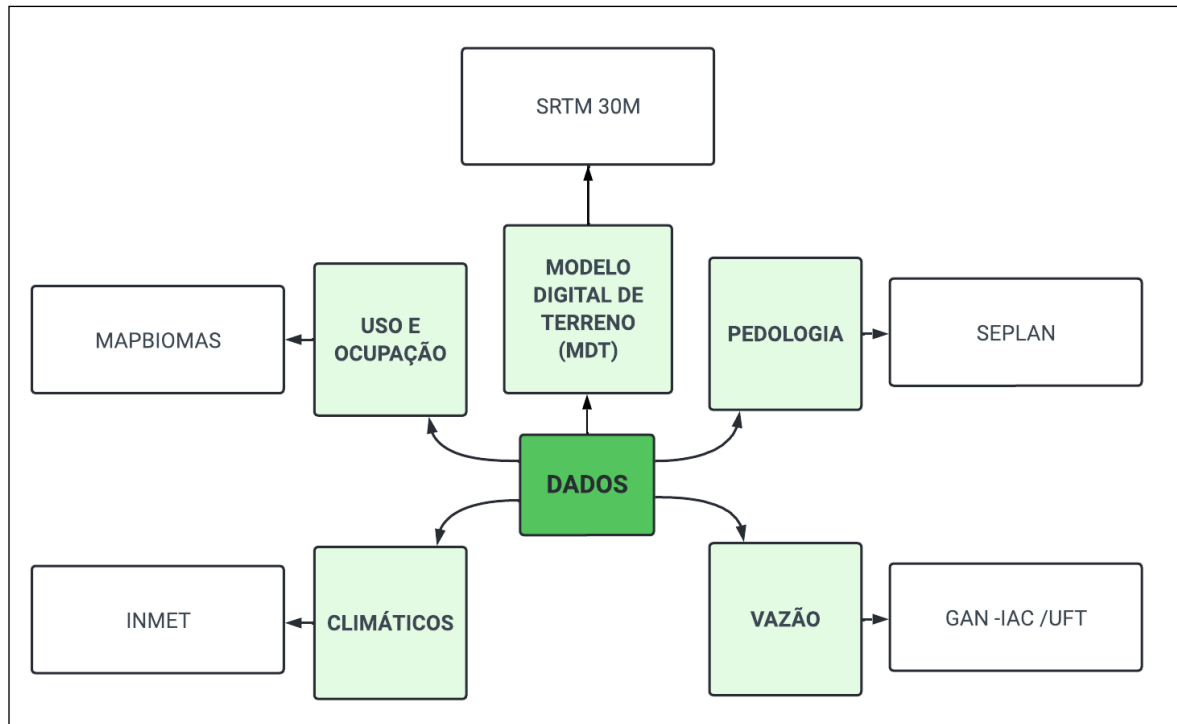


Fonte: Lorrán Michael de P. Macedo (2020)

3.4 DADOS

A aplicação do modelo SWAT encontra algumas barreiras no cenário nacional, pois demanda a entrada de uma quantidade considerável de variáveis. O Brasil não possui uma distribuição homogênea de estações meteorológicas e fluviais no território nacional, sendo a quantidade e qualidade dos dados a maior dificuldade da aplicação desse modelo hidrológico no país. A figura 10, indica a fonte de cada classe de dado utilizado no trabalho.

Figura 10: Fonte dos dados Tabulares e Cartográficos utilizados na modelagem.

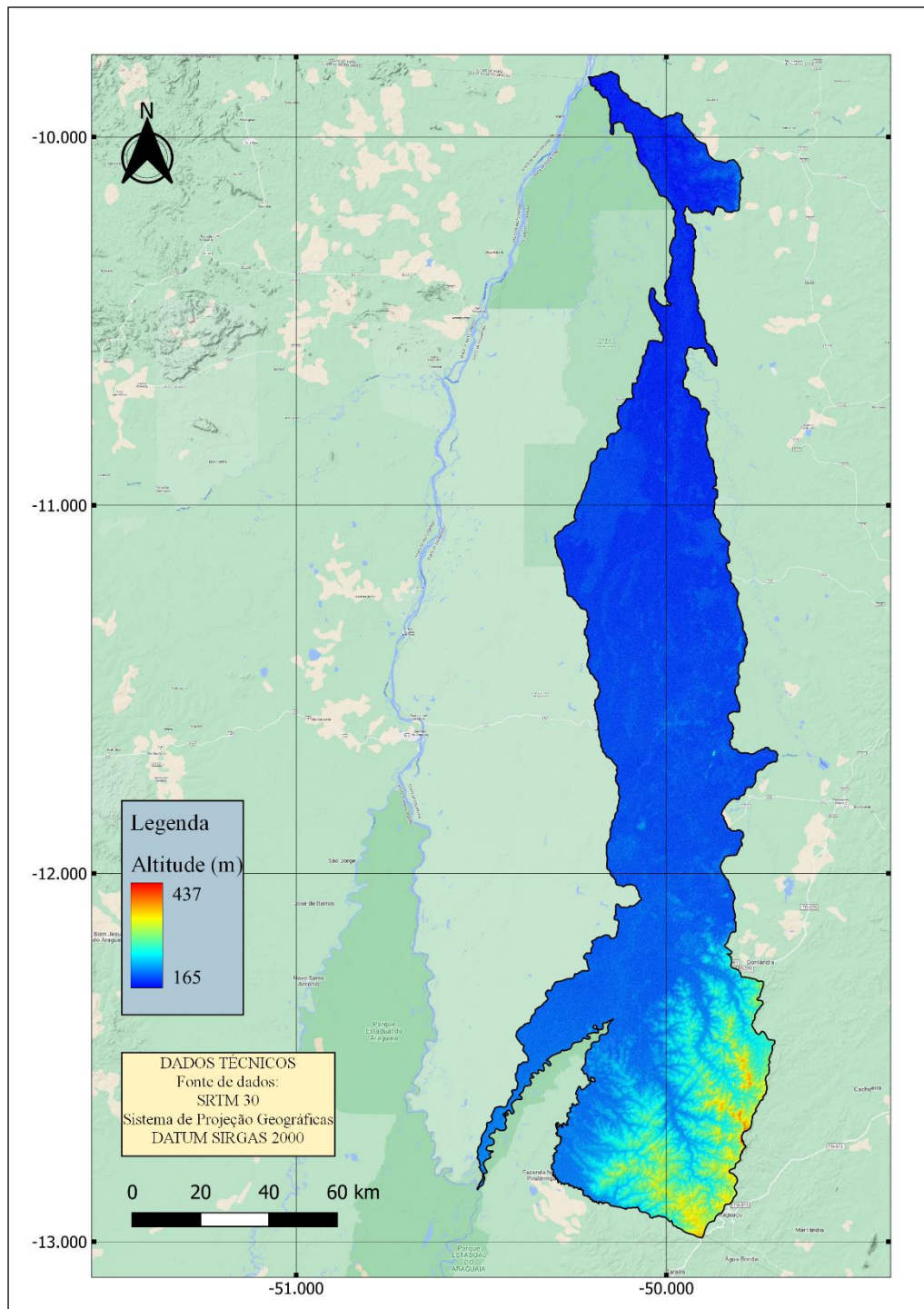


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.4.1 Modelo Digital do Elevação (MDE)

Para a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE), referente a bacia do rio Javaés delimitada pela SEPLAN, foram utilizados dados do sensoriamento remoto advindo da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) realizada em fevereiro de 2000. Estes dados estão dispostos na resolução de 30 x 30 metros e sistema de coordenadas geográfica Datum WGS-84, contudo neste trabalho foram referenciadas no sistema de projeção geográfica SIRGAS 2000, as cartas utilizadas foram S10W050, S10W051, S11W050, S11W051, S12W050, S12W051, S13W050, S13W051. A figura 11 ilustra o mapa hipsométrico elaborado a partir do MDE.

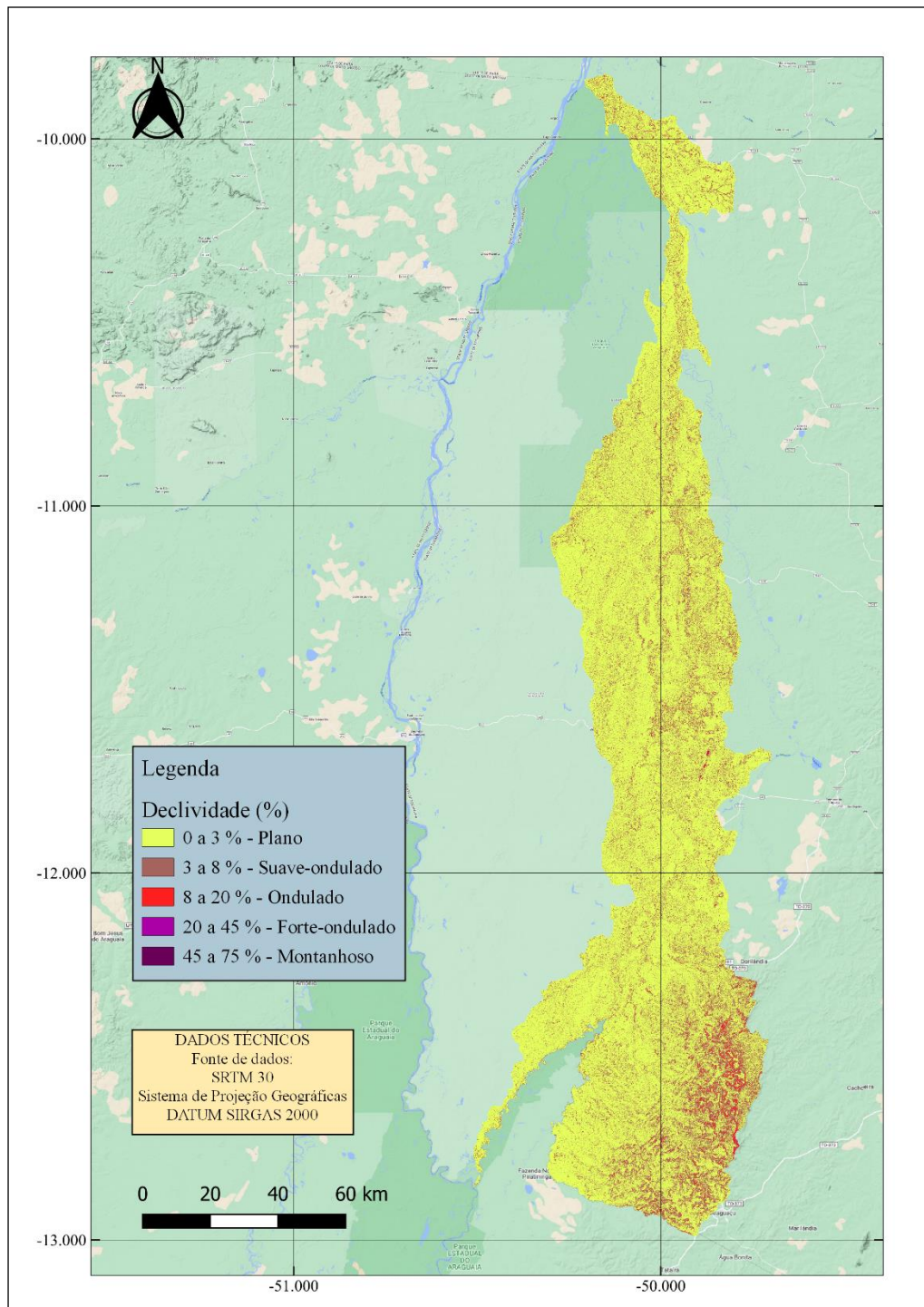
Figura 11: Modelo Digital de Elevação (MDE) da Bacia do rio Javaés.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2022).

Após a obtenção do MDE foi elaborado o mapa de declividade (Figura 12), que demonstra que a bacia é composta basicamente por uma grande planície, com poucas regiões de declividade mais acentuada. As classes foram divididas segundo a metodologia da EMBRAPA.

Figura 12: Mapa de declividade da Bacia do rio Javaés.



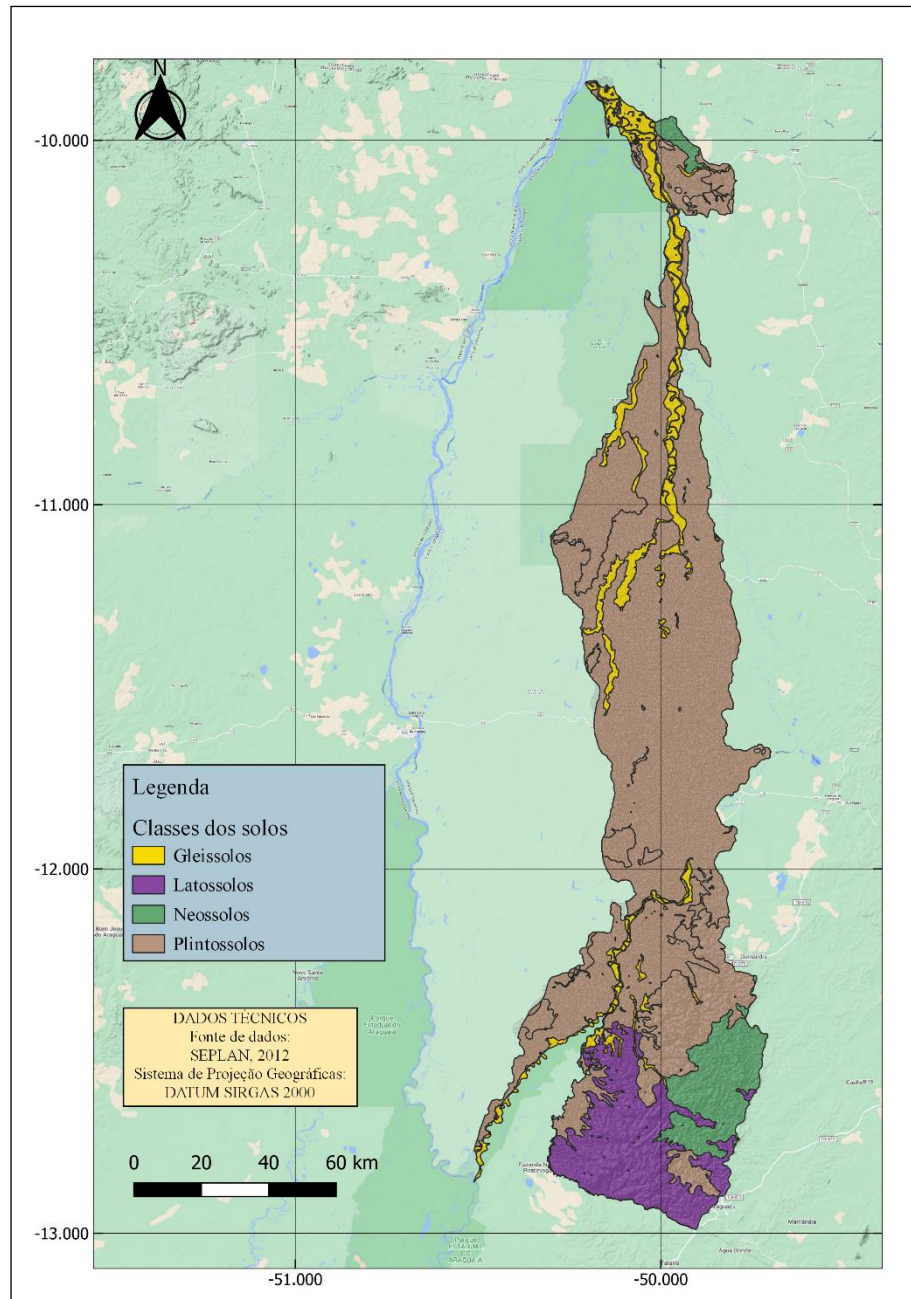
Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2022).

3.4.2 Solo

O mapa pedológico (Figura 13), foi realizado com base na fonte de dados da SEPLAN 2012, demonstra que os plintossolos são amplamente dominantes na planície aluvional, os gleissolos ocupam áreas menores sobre terrenos com relevo plano ou subcôncavo, geralmente

nas terras que circundam as depressões e lagoas. Os latossolos são mais comuns nas regiões elevadas da área de estudo com o solo mais profundo.

Figura 13: Mapa pedológico da Bacia do rio Javaés.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2022).

As características físico-hídricas dos perfis de solo também são requeridas pelo modelo e são organizadas em uma tabela que detalha cada classe de solo presente no mapa pedológico. Os parâmetros necessários à simulação são os seguintes: NLAYERS – número de

horizontes considerados por classe de solo; HYDGRP – grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D); SOL_ZMX – profundidade máxima das raízes (mm); SOL_Z – profundidade de cada horizonte (mm); SOL_BD – densidade do solo (g/cm^3); SOL_AWC – capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm); SOL_K – condutividade hidráulica saturada (mm/h); SOL_CBN – teor de carbono orgânico (%); CLAY – teor de argila (%); SILT – teor de silte (%); SAND – teor de areia (%); ROCK – teor de cascalho ou fragmentos rochosos (%); USLE_K – fator de erodibilidade do solo ($\text{t}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h} / \text{m}^3\cdot\text{t}\cdot\text{cm}$); SOL_ALB – albedo do solo; e SOL_EC – condutividade elétrica. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos no trabalho de Lima et al. (2013), que consistiu na avaliação e desenvolvimento de uma base de dados dos solos característicos do Cerrado para aplicações no modelo SWAT. A Tabela 1 apresenta os valores utilizados para cada tipo de solo considerado na modelagem.

Tabela 1: Parâmetros dos solos.

	HORIZONTE 1				HORIZONTE 2				HORIZONTE 3	
	FX	GX	LVA	RQ	FX	GX	LVA	RQ	LVA	RQ
NLAYERS	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3
HYDGRP	D	D	A	A	D	D	A	A	A	A
SOL_ZMX	300	300	300	300	1000	1000	1000	1000	2000	2000
ANION_EXCL	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
SOL_CRK	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
TEXTURE	STV- L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV-L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV- L- FSL- FSL	STV- L-FSL- FSL	STV-L- FSL- FSL
SOL_Z	300	300	300	300	1000	1000	1000	1000	3500	3500
SOL_BD	1.09	0.87	0.94	1.3	1.09	0.87	0.96	1.38	0.96	1.38
SOL_AWC	0.14	0.13	0.11	0.08	0.14	0.13	0.13	0.08	0.13	0.08
SOL_K	553.78	494.44	1112.85	281.26	553.78	494.44	401.26	102.85	230.05	102.85
SOL_CBN	1.14	2.56	1.69	0.6	1.14	2.56	0.95	0.4	0.95	0.4
CLAY	37.97	51.59	57.36	30.1	37.97	51.59	64.37	34.35	64.37	34.35
SILT	21.91	28.54	24.61	9.65	21.91	28.54	20.54	9.58	20.54	9.58
SAND	40.13	19.86	18.03	60.25	40.13	19.86	15.09	42.9	15.09	42.9
ROCK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,2	0,2	0,2128	0,2314	0,2	0,2	0,2	0,25	0,24	0,24
USLE_K	0.03	0.021	0.019	0.031	0.03	0.021	0.017	0.03	0.017	0.032
SOL_EC	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Plintossolos - FX, Gleissolos - GX, Latossolos vermelho e amarelo - LVA, Neossolo Quartzarênico – RQ.

Fonte: Lima et al. (2013)

3.4.3 Uso e Ocupação da Terra

Os mapas de uso e ocupação da terra, (Figura 14) e (Figura 15), foram elaborados com base no banco de dados do MapBiomias dos anos de 2004 e 2023. Os mapas anuais de cobertura e uso da terra produzidos pelo MapBiomias são criados a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat na escala de resolução de 30 m, sendo utilizado no processo algoritmos de aprendizagem, através da plataforma Google Earth Engine, a coleção 9 do MapBiomias, dispõe de 38 anos de série histórica, com dados de 1985 a 2023, fazendo o uso da delimitação dos biomas em escala de 1:250.000 do IBGE e contando com 25 classes de uso mapeadas.

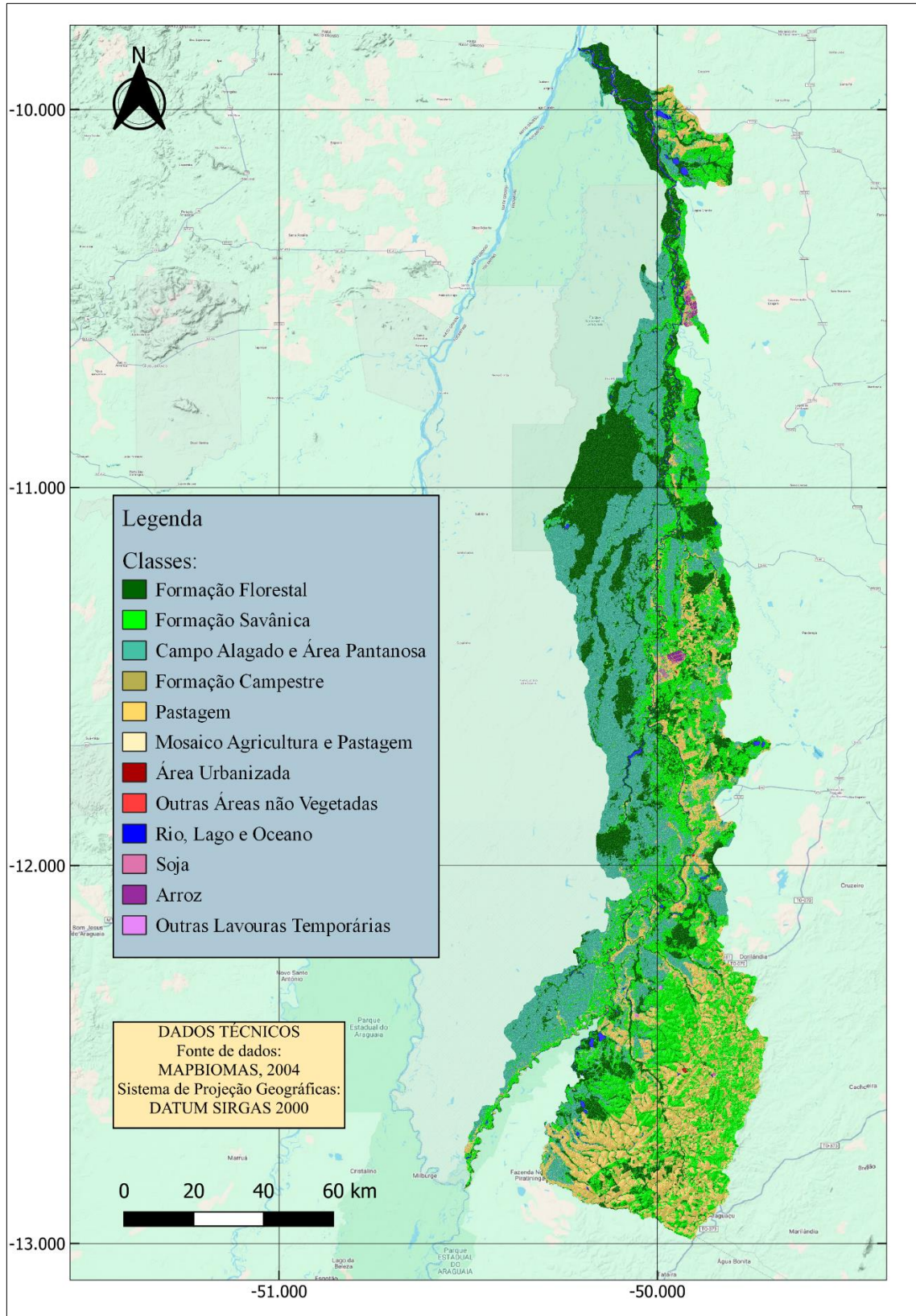
A inserção dos dados de uso e ocupação da terra no SWAT se dá após a delimitação da bacia e sub-bacias, no campo *HRU analyses*. Tendo em vista que o banco de dados do SWAT possui uma série de dados de vegetação e cobertura referente a região dos Estados Unidos, torna-se necessário realizar uma compatibilização entre a vegetação existente na região de influência do rio Javaés com os dados de vegetação disponíveis no SWAT. Autores como Fernandes, et al, (2019) realizaram a sistematização de dados de vegetação para alguns biomas brasileiros na aplicação da modelagem hidrológica com o modelo SWAT. A tabela 2 mostra a adaptação adotada nesse trabalho.

Tabela 2: Adaptação dados de Uso e ocupação da terra.

Dado MapBiomias	Adaptação SWAT
Formação Florestal	Forest-Evergreen
Formação Savânica	Southwestern US (Arid) Range
Campo alagado e área pantanosa	Wetlands-Non-Forested
Formação Campestre	Meadow Bromegrass
Pastagem	Pasture
Mosaico agricultura e pastagem	Agricultural Land-Generic
Area Urbanizada	Residential-Medium Density
Áreas não vegetadas	Residential
Rio, lago, oceano	Water
Soja	Agricultural Land-Close-grown
Arroz	Rice
Outras lavouras Temporárias	Agricultural Land-Row Crops

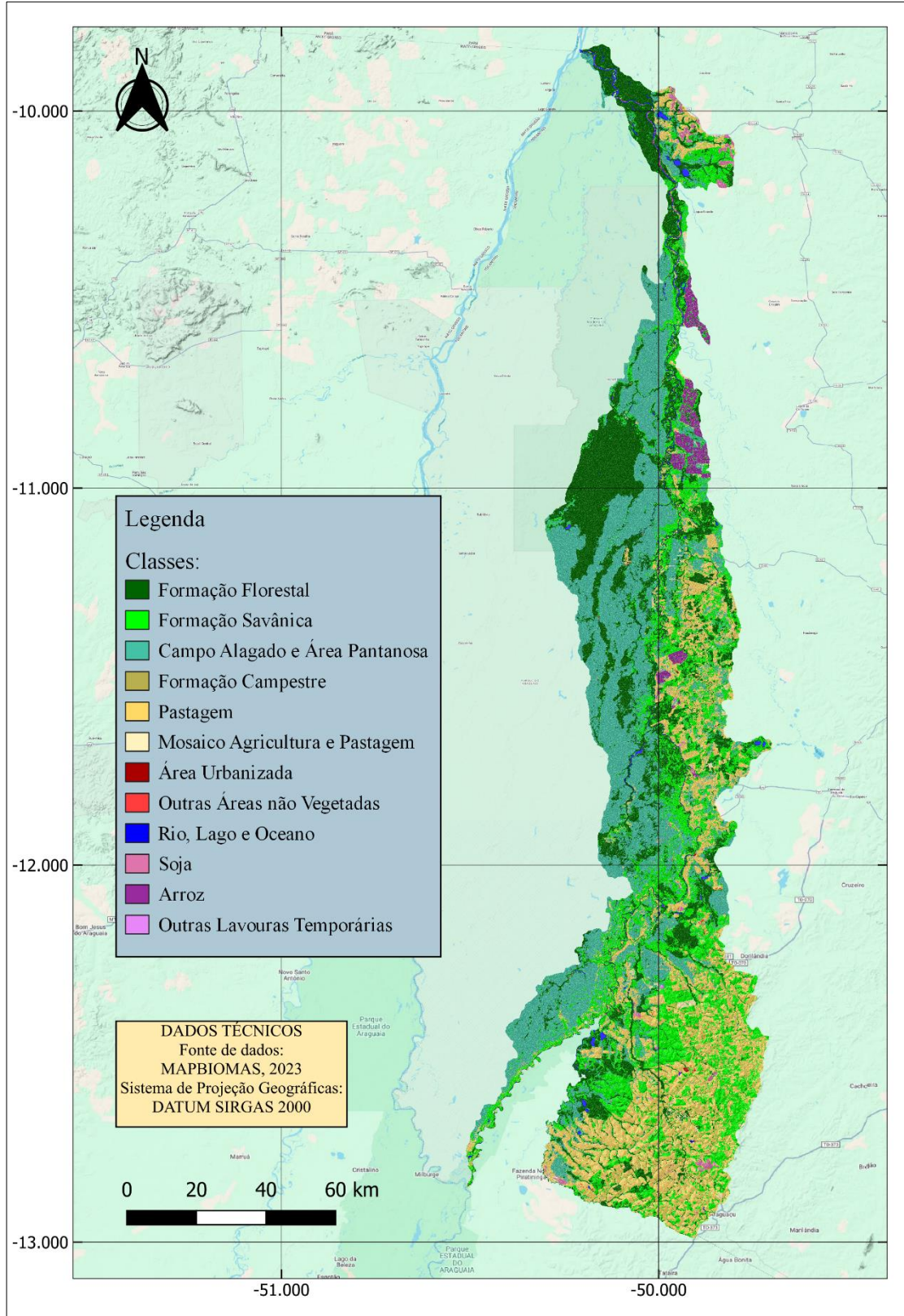
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 14: Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Javaés 2004.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2024).

Figura 15: Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Javaés 2023.



Fonte: Mapa elaborado pelo autor (2024).

3.4.4 Climatologia e Hidrografia

Em relação aos dados climatológicos, foram elaboradas tabelas no formato de leitura do modelo SWAT (Tabelas 3, 4, 5, 6), as quais apresentam a série histórica diária de sua respectiva estação meteorológica. As tabelas foram calculadas e desenvolvidas a partir do gerador climático WGEN (Sharpley & Williams, 1990), em que se faz necessário, informar ao modelo, dados relativos à precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Com tais informações o modelo calcula, entre outras variáveis, a evapotranspiração.

Os dados utilizados no presente trabalho foram fornecidos por quatro estações meteorológicas. Destaca-se primeiramente a estação de Lagoa da Confusão administrada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET cujo o código de referência é A055, encontra-se na Latitude: -10.82, longitude -49.84 e altitude de 178m.

Tabela 3: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Lagoa da Confusão.

VARIÁVEL	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	27.6	28.36	27.44	29.11	31.96	31.87	33.29	35.46	33.97	32.75	30.29	28.42
TMPMN	19.08	19.83	19.13	19.76	19.92	18.17	18	19.29	20.01	20.86	20.72	19.79
TMPSTDMX	11.2	10.42	11.4	10.51	7.8	8.18	6.06	5.34	10.59	9.74	9.16	10.74
TMPSTDMN	7.69	7.09	8	7.24	5.04	5.01	3.87	3.7	6.48	6.21	6.22	7.23
PCPMM	103.31	157.46	133.66	96.13	13.26	9.13	12.46	10.8	26.6	80.73	138.93	139.8
PCPSTD	9.19	14.5	10.76	9.64	2.63	2.17	3.49	1.97	4.28	9.82	11.24	10.63
PCPSKW	3.52	4.04	3.83	4.57	7.68	8.43	12.61	6.94	6.26	6.33	3.48	3.41
PR_W1	0.16	0.21	0.25	0.19	0.04	0.01	0.01	0.02	0.06	0.15	0.27	0.21
PR_W2	0.58	0.55	0.5	0.37	0.12	0.62	0.53	0.62	0.32	0.36	0.45	0.54
PCPD	8.18	9.06	10.4	7.2	1.6	1.06	0.86	1.6	2.66	6.06	10.13	9.93
RAINHHMX	7.66	12.55	11.02	10.35	3.22	0.88	1.35	0.82	5.4	13.66	14.55	10.86
SOLARAV	4.55	4.56	4.62	5.59	7.36	8.62	8.96	8.78	7.75	6.22	5.35	4.84
DEWPT	0.59	0.6	0.57	0.54	0.51	0.47	0.44	0.39	0.38	0.49	0.55	0.57
WINDAV	0.65	0.63	0.66	0.62	0.73	0.87	1.06	1.14	1.04	0.83	0.78	0.68

Fonte: INMET 2017-2024, Elaborado pelo autor (2025).

Tmpmx: Temperatura máxima (°C); tmpmn: Temperatura mínima (°C); tmpstdmx: Desvio da temperatura máxima (°C); tmpstdmn: Desvio da temperatura mínima (°C); pcpmm: Precipitação média (mm); pcpstd: Desvio da precipitação (mm); pcpskw: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima; pr_w(1): Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de seca (%); pr_w(2): Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de chuva (%); pcpd: Número de dias de precipitação (dias); rainhhmx: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm); solarav: Valor diário da energia solar (MJ.m⁻².dia⁻¹); dewpt: Temperatura no ponto de orvalho (°C); windav: Velocidade do vento (m/s)

A estação de Formoso do Araguaia, possibilitou a utilização dos dados compreendidos no intervalo de 2010 a 2024, a estação é operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e fica localizada na região de Formoso do Araguaia, o código da estação é A039, sob a latitude: -11.88, longitude: -49.60 e à 215.2m de altitude. Os dados de precipitação desta estação apresentaram número de falhas maior que as demais, desta forma foram utilizados apenas os dados de temperatura, umidade e velocidade do vento.

Tabela 4: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Formoso do Araguaia.

VARIÁVEL	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	29.65	30.52	29.67	31.01	32.7	32.6	33.34	34.42	33.35	31.82	28.88	28.5
TMPMN	19.17	19.86	19.18	19.78	19.46	19.04	19.25	20.39	20.87	20.58	19.43	19.33
TMPSTDMX	9.44	8.22	9.53	8.37	6.01	6.2	5.84	6.94	9.61	9.96	11.18	11.19
TMPSTDMN	7.53	6.87	7.79	7	5.97	4.86	4.37	4.77	6.24	6.77	7.83	7.72
DEWPT	0.69	0.73	0.69	0.69	0.64	0.57	0.48	0.39	0.39	0.57	0.67	0.67
WNDV	1.1	1.13	1.03	1.09	1.36	1.73	2.01	2.17	1.88	1.54	1.14	1.08

Fonte: INMET 2010-2024, Elaborado pelo autor (2025).

Nos parâmetros relativos à precipitação além das estações já mencionadas, foram utilizados os dados da estação pluviométrica de Sandolândia com código (01249005) na porção rural latitude: -12,5336, longitude: -49,9319 e altitude de 229 m. Monitorada pela ANA, e os dados coletados pela plataforma do GAN IAC/UFT.

Tabela 5: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Sandolândia.

VARIÁVEL	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PCPMM	201.75	238.2	233.1	107.95	27.7	0.95	0	0.3	29.4	122.95	222.4	268.15
PCPSTD	14.01	15.84	15.26	9.54	5.46	0.31	0	0.15	5.48	12.56	17.02	17.47
PCPSKW	3.26	2.73	3.14	3.56	10.02	10.64		17.06	9.17	6.49	4.01	3.3
PR_W1	0.29	0.44	0.4	0.22	0.05	0.01	0	3e-03	0.06	0.23	0.4	0.38
PR_W2	0.58	0.59	0.53	0.43	0.32	0.14	0	0.33	0.22	0.26	0.44	0.58
PCPD	12.95	14.75	14.5	8.6	2.3	0.35	0	0.15	2.2	7.65	12.5	14.85
RAINHHMX	16.91	19.36	19.46	12.71	5.36	0.21	0	0.05	5.43	15.2	21.33	21.46

Fonte: GAN IAC/UFT 2010-2024, Elaborado pelo autor (2025).

Bem como a estação de Sandolândia, a estação denominada, Fazenda COBRAPE, monitorada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, com código 26711000, latitude: -11.46, longitude: -50.007 e altitude: 196 m, também foi utilizada apenas como fonte de dados de precipitação.

Tabela 6: Parâmetros climáticos calculados pelo gerador climático a partir dos dados da estação meteorológica de Fazenda COBRAPE.

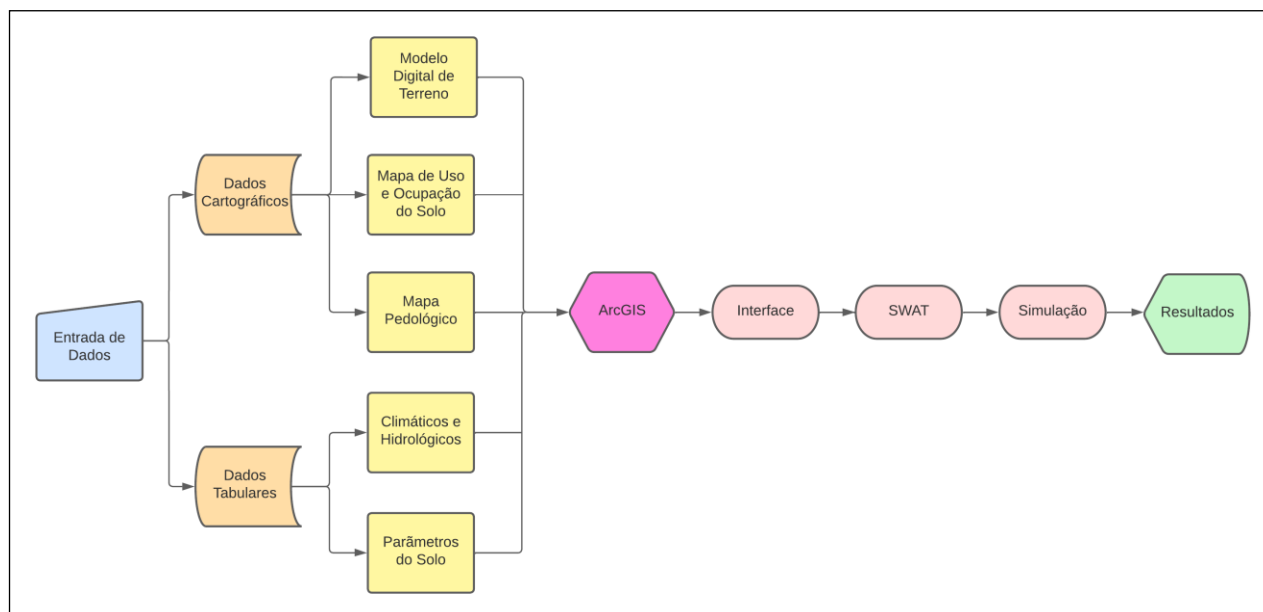
VARIÁVEL	MÊS											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PCPMM	288.40	254.30	201.40	116.80	26.30	0.00	0.00	1.20	23.20	103.50	216.10	264.50
PCPSTD	18.10	16.23	13.91	10.83	5.80	0.00	0.00	0.39	3.97	8.80	15.51	15.70
PCPSKW	3.17	3.18	3.35	4.13	8.23	8.43	12.61	12.98	6.92	3.39	3.11	2.51
PR_W1	0.43	0.49	0.37	0.27	0.04	0.00	0.00	0.01	0.05	0.26	0.42	0.36
PR_W2	0.61	0.63	0.58	0.37	0.20	0.00	0.00	0.20	0.36	0.29	0.55	0.62
PCPD	16.30	16.00	14.60	8.90	1.50	0.00	0.00	0.50	2.20	8.30	14.40	15.10
RAINHHMX	21.6	20.2	18.167	13.7	6.0333	0	0	0.3	3.9333	12.1	20.1	19.467

Fonte: GAN IAC/UFT 2014-2024, Elaborado pelo autor (2025).

3.5 FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT

O SWAT demanda uma quantidade considerável de parâmetros de entrada, estes são diretamente ligados às características físicas da bacia. A modelagem é também muito sensível a estes dados, quanto mais precisos forem, mais próximo de retratar a realidade será o resultado. A figura 16 demonstra o fluxo dos dados durante a modelagem.

Figura 16: Fluxograma dos dados requeridos pelo modelo SWAT.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Anteriormente à modelagem em si, é necessário a produção dos dados cartográficos e padronização dos dados tabulares de acordo com a forma de leitura do modelo SWAT. Os dados cartográficos foram elaborados no ambiente SIG do software ARCGIS, sendo recortados e definidos de acordo com os limites da Bacia do Rio Javaés no Estado do Tocantins e ajustados para o sistema SIRGAS 2000.

O modelo SWAT, por se tratar de um modelo distribuído, procura representar a variabilidade espacial da bacia, essa discretização adotada pelo SWAT é representada pela HRU (Unidade de Resposta Hidrológica). O modelo divide a bacia em sub-bacias e estas em áreas ainda menores, que são as Unidades de Resposta Hidrológica. (CARVALHO, Flavio Herminio, 2014).

Com o banco de dados da região em análise elaborado, é realizada a inserção dos dados no modelo, o primeiro passo é realizar a entrada do MDE através da ferramenta *Watershed Delineation*, em seguida é possível gerar a direção do fluxo e fluxo acumulado (*flow direction*, *flow accumulation*), define-se a área mínima para criação dos rios (densidade da rede), logo após é então criada a rede hidrográfica, delimitando a bacia avaliada por meio da foz e do exutório de cada sub-bacia gerada.

Em seguida no campo *HRU analysis* é realizada a inserção do mapa de uso e cobertura da terra, mapa pedológico e definição das classes de declividade da bacia, gerando assim as

HRU's (Unidades de Resposta Hidrológica). Logo, torna-se possível inserir os dados tabulares pedológicos e seleção do uso e cobertura de sua respectiva área. Após a obtenção das HRU's, realiza-se a definição das HRU's, excluindo as unidades de baixa relevância para simplificação da análise, esse processo é denominado *Thresholds*. Em seguida é inserido os dados climáticos no campo *Write input table > Weather stations*. Desta feita, com todas as etapas concluídas executa-se o modelo. A Figura 17 demonstra as etapas.

Figura 17: Fluxograma de execução do SWAT.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.6 CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS E VALIDAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração é realizado com a finalidade de se obter resultados de simulações que mais se assemelham aos dados medidos (Stehr et al., 2009). Uma das propostas da calibração é o ajuste sequencial dos dados de entrada até que se obtenha uma resposta satisfatória de saída, após a conclusão da calibração o modelo é rodado, usando os mesmos parâmetros calibrados para o período de validação (Arnold et al., 2000).

O manual de calibração do SWAT, revela que o modelo realiza uma calibração automática através do método Shuffled Complex Evolution (SCE), o algoritmo SCE opera com uma população de pontos, de forma a evoluir em direção ao ótimo global de uma única função, por meio de sucessivas interações e avaliações da função objetivo. No entanto, existe uma segunda forma de calibração, utilizando o software SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs for SWAT), essa foi a forma utilizada neste trabalho.

O software SWAT-CUP disponibiliza quatro algoritmos para a elaboração da calibração de acordo com a necessidade do usuário, sendo eles: GLUE61 (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) e MCMC (Markov Chain Monte Carlo) (Abbaspour, 2013). O método SUFI2 foi o adotado no presente trabalho.

Em projetos de simulações hidrológicas a utilização de técnicas como análises gráficas e índices estatísticos são comumente utilizados para correlações entre dados estimados e dados observados (SILVA, 2013). No processo de validação do modelo foram empregados três fundamentos estatísticos: o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NS) e o percentual de tendência (PBIAS).

O R^2 é definido como a relação que mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente, descrito pela equação 8:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Em - E) (Es - Eb)]^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2 \sum_{i=1}^n (Es - Eb)^2} \quad (8)$$

A expressão do R^2 mostra que o coeficiente de determinação é sempre um número positivo entre zero e um, que quanto maior for o R^2 , melhor será o poder de explicação da reta de regressão. Sendo “Em” vazões observadas, “Es” vazões simuladas, “E” é a média das vazões observadas, “Eb” é a média das vazões simuladas e “n” o número de eventos

O coeficiente de eficiência Nash e Sutcliffe (NS) determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variação dos dados medidos (Moriassi, 2007). O coeficiente de eficiência pode variar entre negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste. Quando o valor do NS resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado muito bom, para valores de NS entre 0,65 e 0,75, o desempenho é considerado bom, enquanto valores de NS entre 0,5 e 0,65 é um desempenho satisfatório, valores abaixo de 0,5 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável. A tabela 5 mostra a classificação de performance dos índices.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2} \quad (9)$$

Sendo “Em” vazões observadas, “Es” vazões simuladas, “E” é a média das vazões observadas e “n” o número de eventos.

O índice PBIAS calculado pela equação 10, avalia o percentual da tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados. Os valores ótimos desse índice estatístico são aqueles cujo resultado é 0, ou seja, quanto mais próximo de 0 maior é a precisão da simulação. Valores positivos indicam a tendência de subestimar os resultados simulados pelo modelo utilizado, enquanto valores negativos indicam tendência a superestimar os valores simulados (GUPTA et al., 1999) citado por (SILVA, 2013).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Em)} \right] \quad (10)$$

Sendo “Em” vazões observadas, “Es” vazões simuladas e “n” o número de eventos.

A tabela 7 mostra a classificação da performance dos índices estatísticos adotados R², NS e PBIAS, segundo a classificação feita por Moriasi et al. (2007).

Tabela 7: Índices estatísticos e sua classificação quanto o desempenho.

Crítérios de Eficiência Estatística		
Índice	Intervalo	Classificação de performance
R ²	0,7 < R ² < 1	Muito Bom
	0,6 < R ² < 0,7	Bom
	0,5 < R ² < 0,6	Satisfatório
	R ² < 0,5	Insatisfatório
NS	0,75 < NS < 1	Muito Bom
	0,65 < NS < 0,75	Bom
	0,5 < NS < 0,65	Satisfatório
	NS < 0,5	Insatisfatório
PBIAS	PBIAS < ±10%	Muito Bom
	±10 % < PBIAS < ±15%	Bom
	±15 % < PBIAS < ±25%	Satisfatório
	PBIAS > ±25%	Insatisfatório

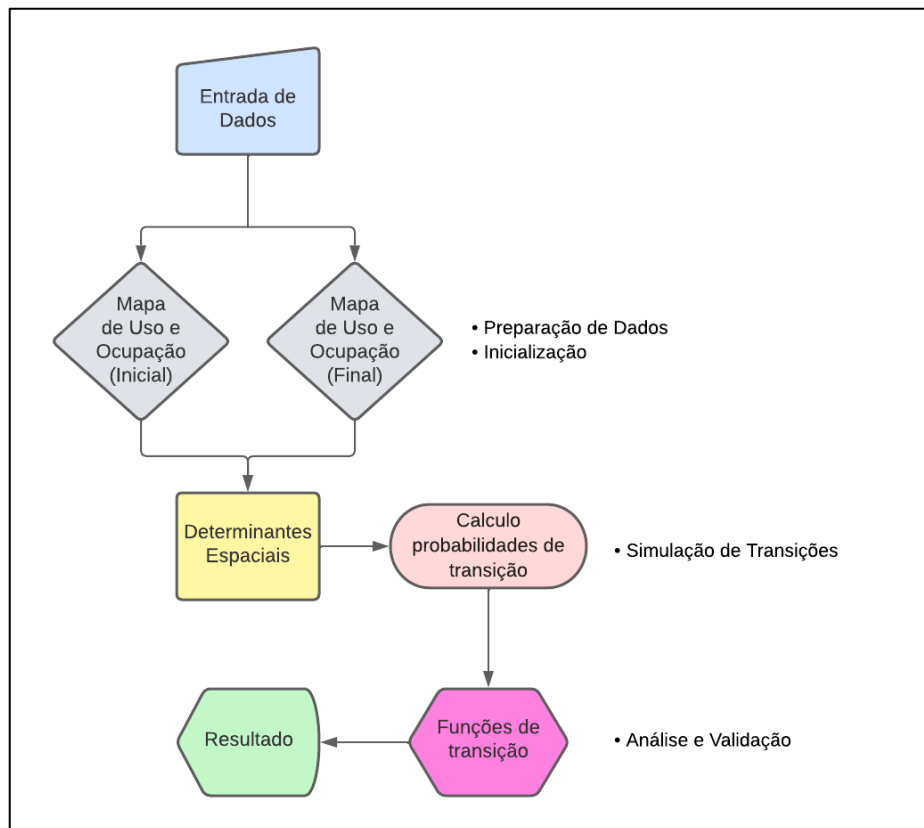
Fonte: Moriasi et al. (2007) e Gupta et al. (1999).

Tendo em vista que a simulação utilizou os dois anos iniciais de 2014 e 2015 para o aquecimento do modelo. O período de *warm up* (aquecimento) é fundamental na simulação, pois o modelo não conhece as condições iniciais das variáveis da bacia. As vazões obtidas pela simulação, foram comparadas, para calibração e validação do modelo, com os valores medidos pelas estações fluviométricas da Barreira do Pequi e Fazenda COBRAPE, ambas monitoradas pela ANA, localizadas respectivamente na sub-bacia 139 e sub-bacia 102 da simulação.

3.7 FUNCIONAMENTO DO MODELO DINAMICA EGO

Assim como o modelo SWAT, o Dinamica EGO é sensível aos dados de entrada. Sua eficácia depende diretamente da qualidade e precisão dos dados utilizados, como mapas de uso e cobertura da terra, variáveis ambientais e dados espaciais históricos, A Figura 18 demonstra as etapas gerais de funcionamento do modelo.

Figura 18: Fluxograma de funcionamento geral do Dinamica EGO.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A primeira etapa do funcionamento do modelo envolve a preparação dos dados, com a coleta e organização de informações históricas espaciais, incluindo mapas de uso e cobertura

da terra inicial e final. Além disso, são inseridas variações espaciais, organizadas em dois grupos: dinâmicas e estáticas. As variáveis espaciais estáticas não mudam ao longo da simulação. Elas são calculadas e armazenadas no início, permanecendo constantes durante todos os passos do tempo tais como: altimetria, declividade, proximidade a corpos d'água, distância a estradas ou infraestruturas, tipo de solo, cobertura vegetal, áreas protegidas, porém este trabalho utilizou como variável espacial estática apenas a declividade. As variáveis espaciais dinâmicas são atualizadas a cada passo do tempo da simulação, refletindo as mudanças que ocorrem no cenário ao longo do tempo, dentre elas a distância a áreas convertidas, tempo de permanência ou idade da célula, proximidade de áreas em expansão, fragmentação da paisagem (SOARES-FILHO et al., 2002).

Em seguida, ocorre a limitação do modelo por meio de métodos estatísticos, como a regressão logística, que calcula as probabilidades de transição entre diferentes classes de uso da terra, permitindo identificar os fatores que determinam as mudanças observadas (SOARES-FILHO et al., 2013). Por fim, na fase de análise e validação, os resultados das simulações são comparados com dados reais para avaliar a acurácia do modelo, permitindo ajustes nas configurações e garantindo que ele represente com precisão os padrões históricos de transição. Isso possibilita sua aplicação na simulação de cenários futuros, como políticas de conservação ou expansão agrícola.

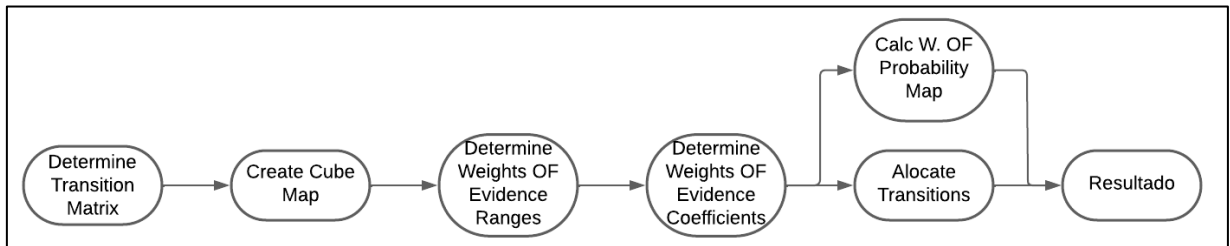
3.8 SIMULAÇÃO PROPOSTA E CENÁRIO PROGNÓSTICO

Utilizando o Dinamica EGO, este estudo propõe a modelagem de cenários futuros de uso e cobertura da terra para a região do rio Javaés, tomando como base as dinâmicas de transição observadas no período histórico de 2004 a 2023. A partir do mapa de referência de 2023, projeta-se a configuração territorial para 2043, horizonte de 20 anos, com ênfase na avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes dessas transformações. Essa abordagem permite não apenas compreender os padrões espaciais de mudança, mas também antecipar possíveis respostas do sistema hídrico diante das pressões antrópicas, oferecendo subsídios para o planejamento territorial sustentável na região. O software adotado no presente trabalho está em sua versão Dinamica EGO 8 - 8.3.0.

Os *Functores* são importantes componentes do Dinamica EGO, eles representam unidades de processamento dentro do modelo, podendo ser entendido como um bloco de construção modular, que executa uma operação específica, como por exemplo, carregar mapas,

calcular distâncias, aplicar pesos de evidência. Os *functores* são equivalentes a funções em programação, mas possuindo uma interface visual. A Figura 19 apresenta os principais *functores* utilizado neste trabalho, com a finalidade de elaborar um mapa futuro de uso e ocupação da terra.

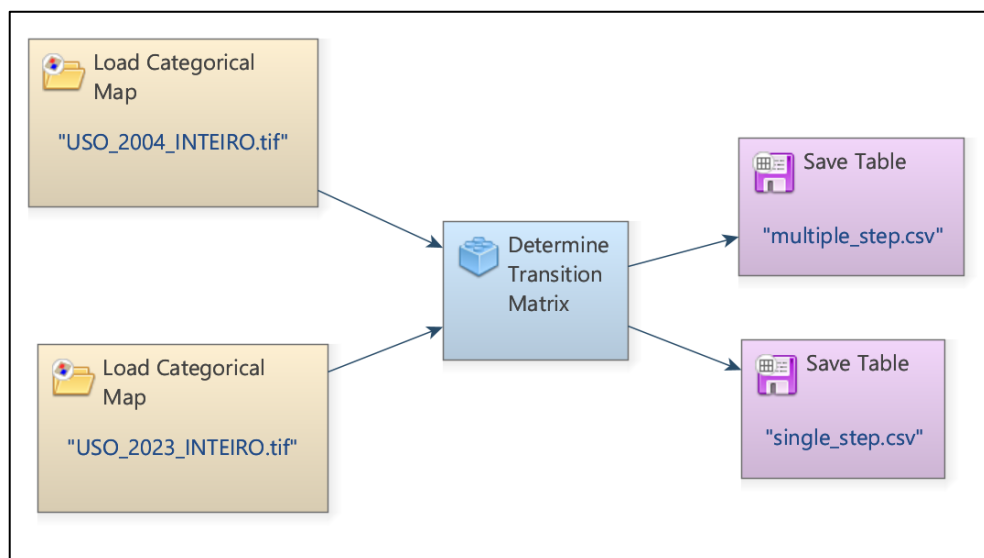
Figura 19: Principais functores utilizados na execução do cenário prognóstico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O passo inicial na quantificação da dinâmica de mudança do uso da terra envolve o cálculo de matrizes de transição históricas utilizando o *functor Determine Transition Matrix* no Dinamica EGO. Este *functor* requer duas entradas principais, um mapa de *Initial Landscape* que é o mapa de paisagem inicial e um mapa de paisagem final *Final Landscape*, que representam as configurações de uso e cobertura da terra em dois pontos distintos no tempo. O *functor* pode derivar uma *Single Step Matrix*, para todo o período de calibração e uma *Multiple Step Matrix*, que corresponde a unidade de tempo definida, neste trabalho foi anual. (LEITE-FILHO et al., 2020). A Figura 20 demonstra a elaboração desta etapa.

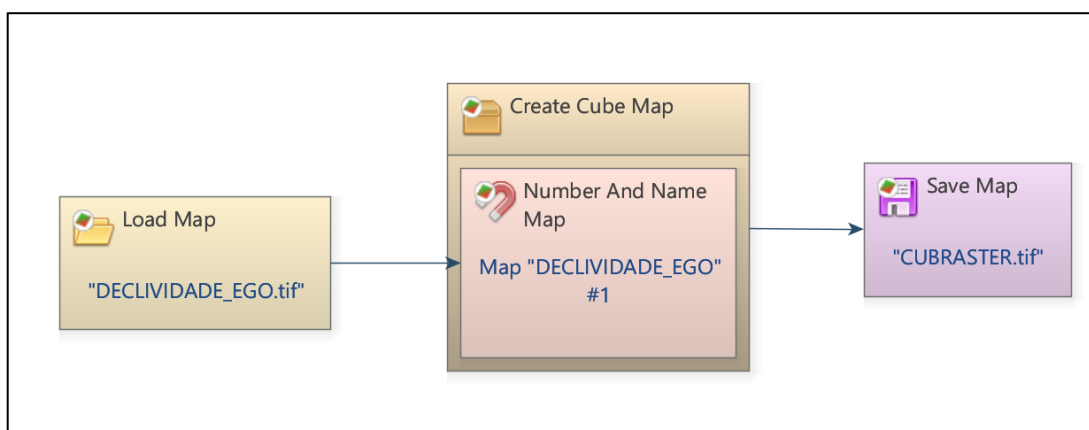
Figura 20: Determinação das matrizes de transição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A segunda etapa realiza a integração de múltiplas variáveis explicativas espaciais no Dinamica EGO, sendo a criação de um Mapa Cubo Raster. Nesta plataforma, um cubo raster é definido como uma imagem multicamadas, que efetivamente empilha várias imagens raster individuais em uma única estrutura de dados. Seu principal objetivo é consolidar todas as variáveis explicativas relevantes em um formato espacialmente consistente, otimizando seu uso por *functors* analíticos subsequentes. No presente trabalho utilizou-se por base o mapa de declividade. O processo de criação envolve o uso de múltiplas funções *Load Map* para inserir camadas de variáveis espaciais individuais, que são então ligadas a um *functor Create Cube Map*, e finalmente salvas por meio de uma função *Save Map*. Necessariamente, todos os mapas de entrada conectados ao *functor Create Cube Map* devem compartilhar a mesma projeção geográfica, coordenadas de registro e possuir o mesmo número de linhas e colunas, esta etapa pode ser visualizada na Figura 21 (LEITE-FILHO et al., 2020).

Figura 21: Criação do cubo raster.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

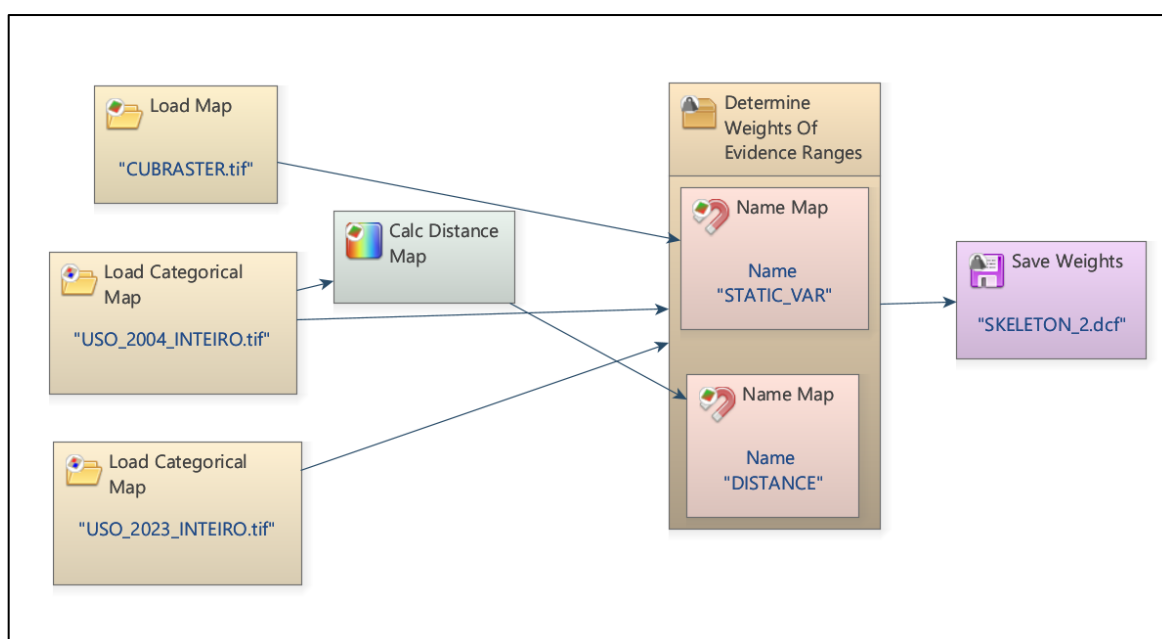
Na terceira etapa, o método dos Pesos de Evidência (WoE), opera principalmente com variáveis categóricas. Portanto, uma etapa preliminar crucial para variáveis explicativas contínuas por exemplo, mapas de distância e elevação é sua conversão em intervalos discretos ou categorias. O *functor Determine Weights Of Evidence Ranges* é especificamente projetado para essa finalidade, definindo a categorização ótima com base na estrutura dos dados. As transições definidas neste trabalho estão demonstradas na Tabela 8, (LEITE-FILHO et al., 2020).

Tabela 8: Transições adotadas.

Transição	
De	Para
Formação Savânica	Arroz
Formação Savânica	Pastagem
Pastagem	Arroz/Soja
Campos Alagados	Arroz

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

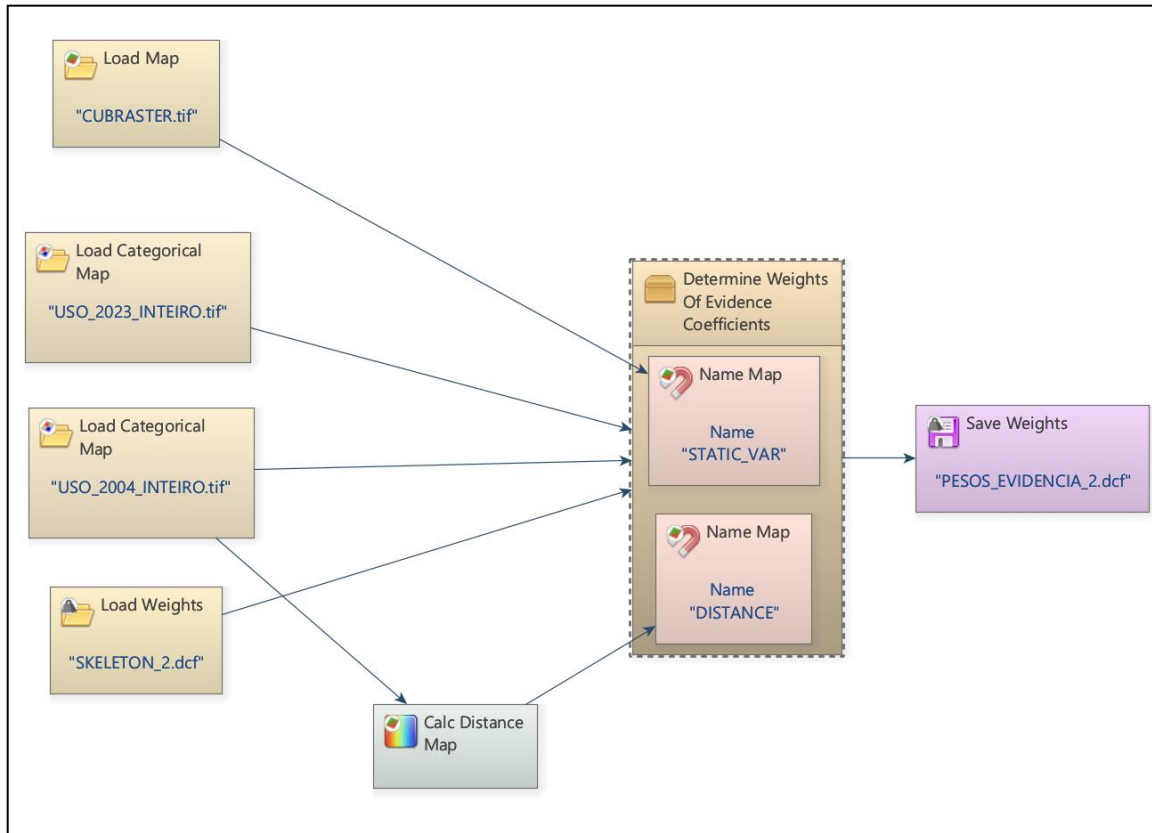
Figura 22: Determinação dos intervalos dos pesos de evidência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O *functor Determine Weights of Evidence Coefficients* é central para a calibração do modelo de simulação espacial, quantificando as relações empíricas entre variáveis espaciais e a mudança do uso da terra. Este método calcula a influência de variáveis espaciais selecionadas em transições específicas do uso da terra. Para modelar as transições do uso da terra neste trabalho, foi adotado no Dinamica EGO o método WoE padrão. Em vez de considerar toda a área de estudo, a análise para uma transição da classe i para j por exemplo, transição de vegetação savânica para pastagem, é restrita à área inicialmente ocupada pela classe i , ou seja, a área de vegetação savânica. Este método é implementado por meio da tabulação cruzada de mapas, em que cada célula representa uma combinação única de classes de mapas de entrada sobrepostas. Os resultados, incluindo coeficientes e significância estatística, são disponibilizados em uma tabela, (LEITE-FILHO et al., 2020). A Figura 23 demonstra a etapa.

Figura 23: Determinação dos coeficientes dos pesos de evidência.



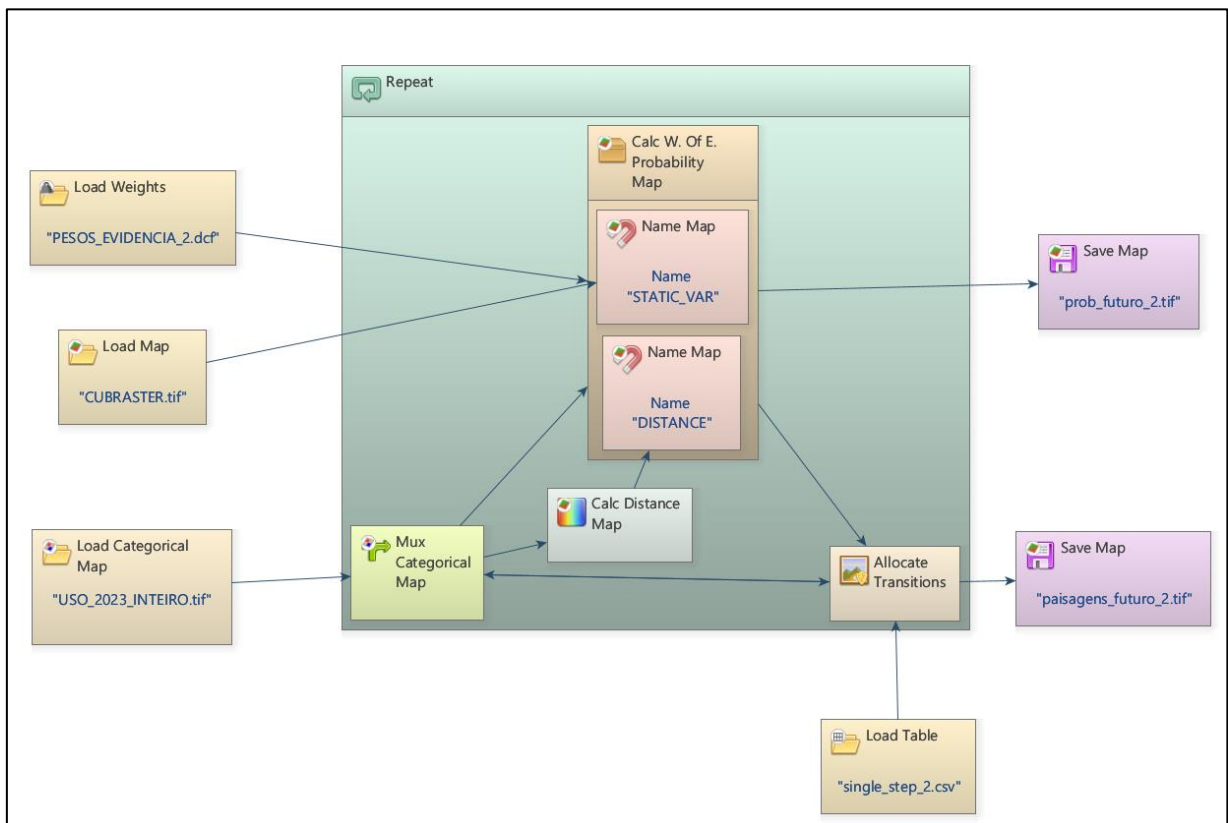
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a determinação dos coeficientes dos Pesos de Evidência, o próximo passo é a criação do mapa de probabilidade de transição, realizado pelo *functor Calc W. Of E. Probability Map*. Este *functor* tem como objetivo calcular e gerar um mapa que representa a probabilidade espacial de ocorrência de cada transição de uso e cobertura da terra. A etapa final do processo de modelagem é a alocação das transições e a consequente geração do mapa de projeção futura, realizada pelo *functor Allocate Transitions*. Este *functor* executa a alocação espacial real das mudanças no uso da terra, produzindo o mapa de projeção futura. As principais entradas de dados para este *functor* incluem, o mapa de paisagem inicial para a etapa de simulação, o mapa de probabilidade de transição gerado na etapa anterior, a matriz que define as taxas líquidas de cada transição, calculadas na primeira etapa, uma matriz que define a porcentagem total de transições a serem realizadas pela expansão de manchas existentes. Os parâmetros utilizados nos operadores *Expander* e *Patcher*, respectivamente, definem a geometria e o comportamento das manchas.

O Dinâmica EGO utiliza duas funções de transição complementares baseadas em Autômatos Celulares, o *Expander* e o *Patcher*. O *Expander* é responsável por expandir ou

contrair manchas preexistentes de uma determinada classe. O *Patcher*, por sua vez, é projetado para gerar ou formar novas manchas. A ligação entre quantidade e espaço é o ponto culminante do modelo. Esta etapa é onde as previsões quantitativas, derivadas da matriz de transição são conectadas aos padrões espaciais provenientes do mapa de probabilidade e das regras dos Autômatos Celulares. É o momento em que a quantidade de mudança é distribuída onde é mais provável de ocorrer, moldada pelas regras espaciais definidas, tamanho da mancha, forma. A alocação de transições é um processo dinâmico e iterativo, que reflete como as mudanças se manifestam fisicamente na paisagem ao longo do tempo, (LEITE-FILHO et al., 2020).

Figura 24: Criação do mapa de probabilidade e do mapa de uso e ocupação futuro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, a integração entre os modelos SWAT e Dinamica EGO será realizada a partir do mapa de uso e ocupação da terra projetado para o ano de 2043. Esse mapa será incorporado à base de dados do SWAT, utilizando a mesma delimitação da bacia hidrográfica previamente definida e mantendo os mesmos valores de precipitação adotados nas simulações anteriores, diferenciando-se apenas quanto ao cenário de uso e cobertura da terra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo e a discussão baseando-se na literatura. Assim, são expostas a caracterização da bacia e a avaliação das simulações geradas a partir da modelagem hidrológica bem como, o cenário futuro prognóstico.

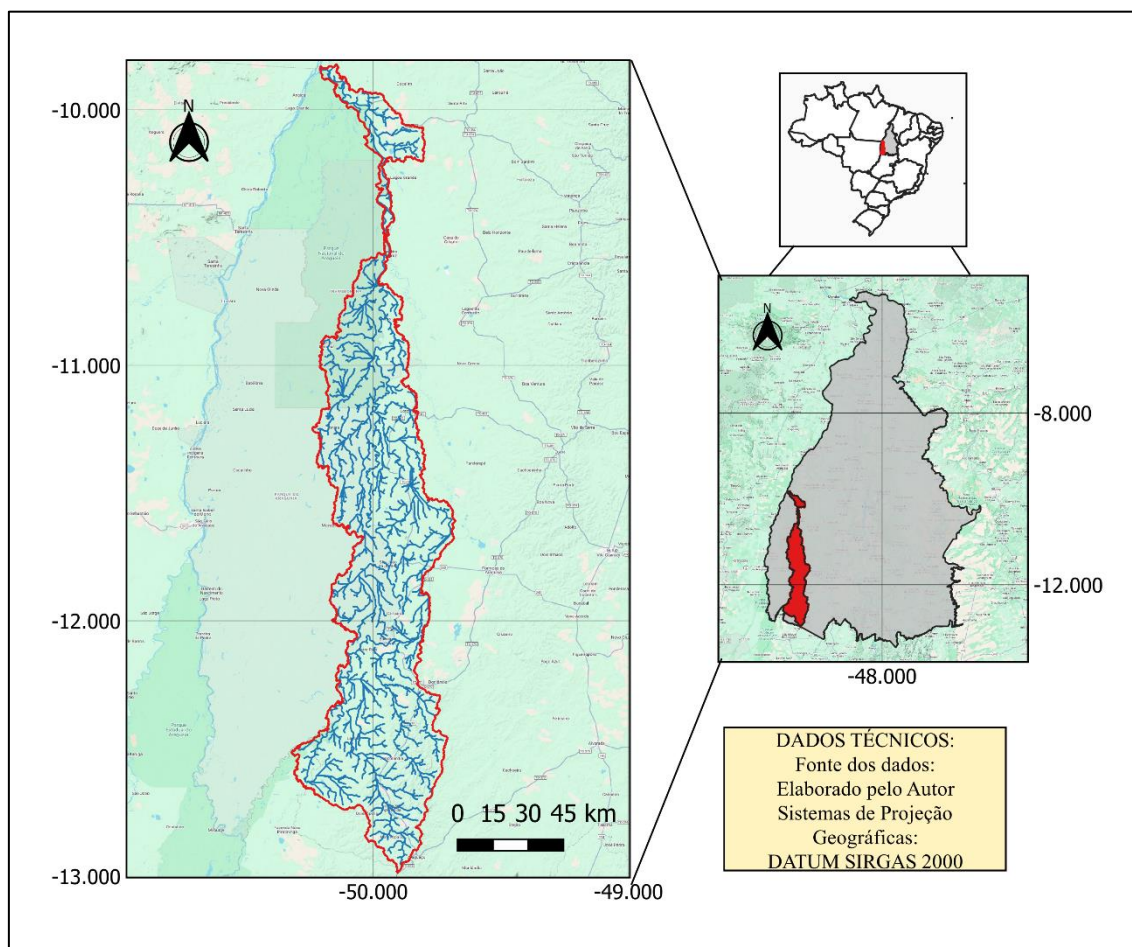
4.1 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A delimitação da bacia ocorre com base no modelo digital de elevação (MDE), a versão do ArcSWAT utilizado no presente trabalho, permite a utilização de uma camada máscara para definir os limites da bacia, desta forma, foi inserido no modelo a região definida pelo zoneamento da Secretaria de Planejamento do Tocantins (SEPLAN) como camada máscara, delimitando os limites da bacia do rio Javaés. Tendo em vista que o estabelecimento da bacia no SWAT ocorre conforme análise da topografia do relevo, a bacia gerada como resultado (Figura 25), não foi estritamente a mesma definida pela SEPLAN, contudo, possui similaridade em geometria e extensão.

A bacia delimitada possui uma área de drenagem de 10.062,91 km², foi adotado para a construção das linhas de fluxo do modelo, 2.000 ha como área mínima de contribuição, ajustando o controle de densidade da rede de drenagem, permitindo que tanto os canais principais quanto os tributários de menor ordem fossem representados. Levando em consideração a grande extensão da bacia avaliada, foram obtidas 241 sub-bacias na simulação. Apesar da grande quantidade de sub-bacias geradas, as áreas dessas sub-bacias, apresentaram valores diferentes entre si, principalmente devido o formato irregular da bacia, contudo foi possível obter certa homogeneidade no resultado geral, pois é importante que as sub-bacias tenham dimensões próximas, de forma a aumentar a precisão da simulação. O Modelo Digital de Elevação, apresentou altitudes variando entre 437m na região mais ao sul da bacia, até 165m ao norte da bacia no encontro com o rio Araguaia. As figuras 25 e 26 mostram a divisão da bacia em sub-bacias, a rede de drenagem resultante e o ponto de exutório localizado na sub-bacia 1.

As sub-bacias 139 e 102 representam respectivamente a localização das estações de Barreira do Pequi e Fazenda COBRAPE e integram toda a vazão gerada a montante, servindo como ponto de controle para a calibração e validação do modelo, possibilitando a comparação entre as vazões observadas nas estações mencionadas, com a simulada pelo modelo.

Figura 26: Hidrografia da bacia gerada



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA (URH'S)

O modelo gerou 2.992 URH's. As Unidades de Resposta Hidrológica são as menores unidades consideradas pelo modelo SWAT, resultado da combinação entre tipo de solo, uso e cobertura da terra e declividade da bacia. Na simulação da bacia foi utilizado a ferramenta *Thresholds*, que permite realizar generalizações, desconsiderando pequenas áreas em sub-bacias em relação aos tipos de solos, usos e coberturas ou declividade, este trabalho adotou os valores de 10% para tipo de solo, uso e cobertura e declividade, dessa forma as classes que obtiveram ocorrência acima de 10% da área da sub-bacia foram consideradas nas URH's.

Observando a Tabela 9 extraída da modelagem, verifica-se que houve estabilidade na fitofisionomia florestal no período analisado, em contrapartida, as regiões nativas de formação

savânica (cerrado), foram diminuídas expressivamente em 21,03%. No ano de 2004, 79,57% da bacia era composta por vegetações nativas, no ano de 2023 percebe-se que a área de vegetação nativa diminuiu para 73,01%, dessa forma, evidencia-se uma redução percentual de 8,24% na área preservada da região de influência do rio Javaés. A vegetação dominante na bacia é de formação savânica (cerrado), a cultura de maior extensão na bacia é a pastagem, a aptidão das terras especialmente ao sul da região de influência do Javaés é comprovada pelo amplo crescimento de 26,6% no período avaliado. Percebe-se também o crescimento no plantio de soja e arroz, passando de um valor inexpressivo em 2004 para valores mais expressivos em 2023, a exemplo do arroz que cresceu mais de 13 vezes o tamanho da área plantada.

Tabela 9: Uso e cobertura

Uso e Cobertura	Representatividade da Área (%)	
	2004	2023
Formação Florestal	21.90	22.00
Formação Savânica	32.09	25.34
Campo alagado e área pantanosa	25.53	25.60
Formação Campestre	0.05	0.07
Pastagem	17.39	22.01
Mosaico agricultura e pastagem	1.00	1.27
Area Urbanizada	0.02	0.03
Áreas não vegetadas	0.25	0.39
Rio, lago, oceano	1.49	1.26
Soja	0.11	0.63
Arroz	0.09	1.23
Outras lavouras Temporárias	0.04	0.16

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 10 indica os tipos de solos e sua porcentagem em área dentro da bacia hidrográfica influenciada pelo rio Javaés, com amplo domínio dos plintossolos (FX), os solos referentes a área de estudo foram carregados no banco de dados do SWAT seguindo as propriedades físico-hídricas já descritas anteriormente.

Tabela 10: Tipos de solos

Tipo de solo	Representatividade da Área (%)
FX	74.50
GX	9.07
RQ	8.57
LVA	7.86

Plintossolos - FX, Gleissolos - GX, Latossolos vermelho e amarelo - LVA, Neossolo Quartzarênico – RQ.

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 11 demonstra os valores de declividade da bacia, comprovando a sua característica de planície, com declividades baixas. As declividades até 7% somam cerca de 93,7% da área da bacia, sendo os valores de declividade acima de 7% representando áreas mais concentradas ao sul da região avaliada.

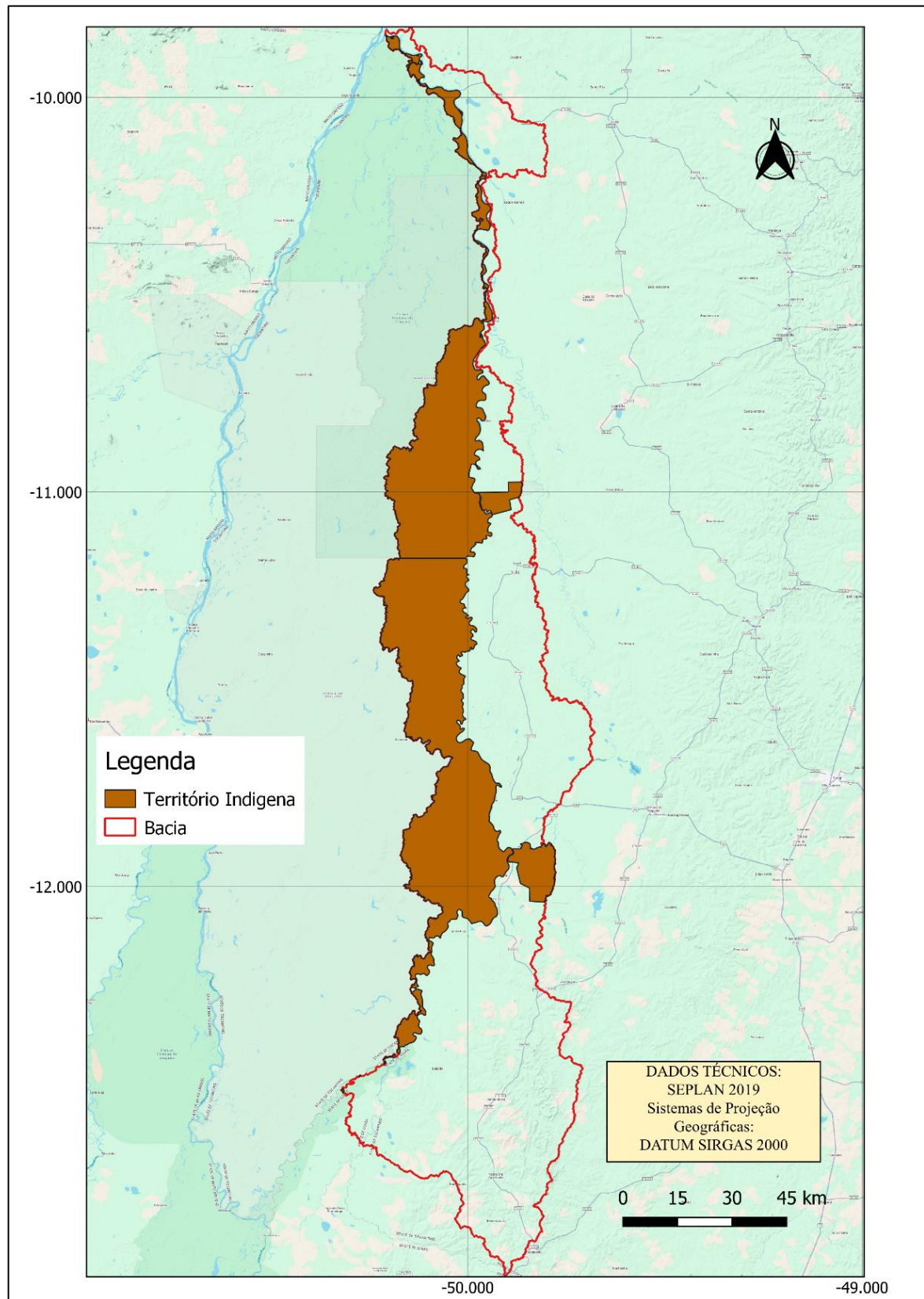
Tabela 11: Declividade

Declividade (%)	Representatividade da Área (%)
0 - 3	43.83
3 – 7	49.87
< 7	6.3

Fonte: Elaborado pelo autor

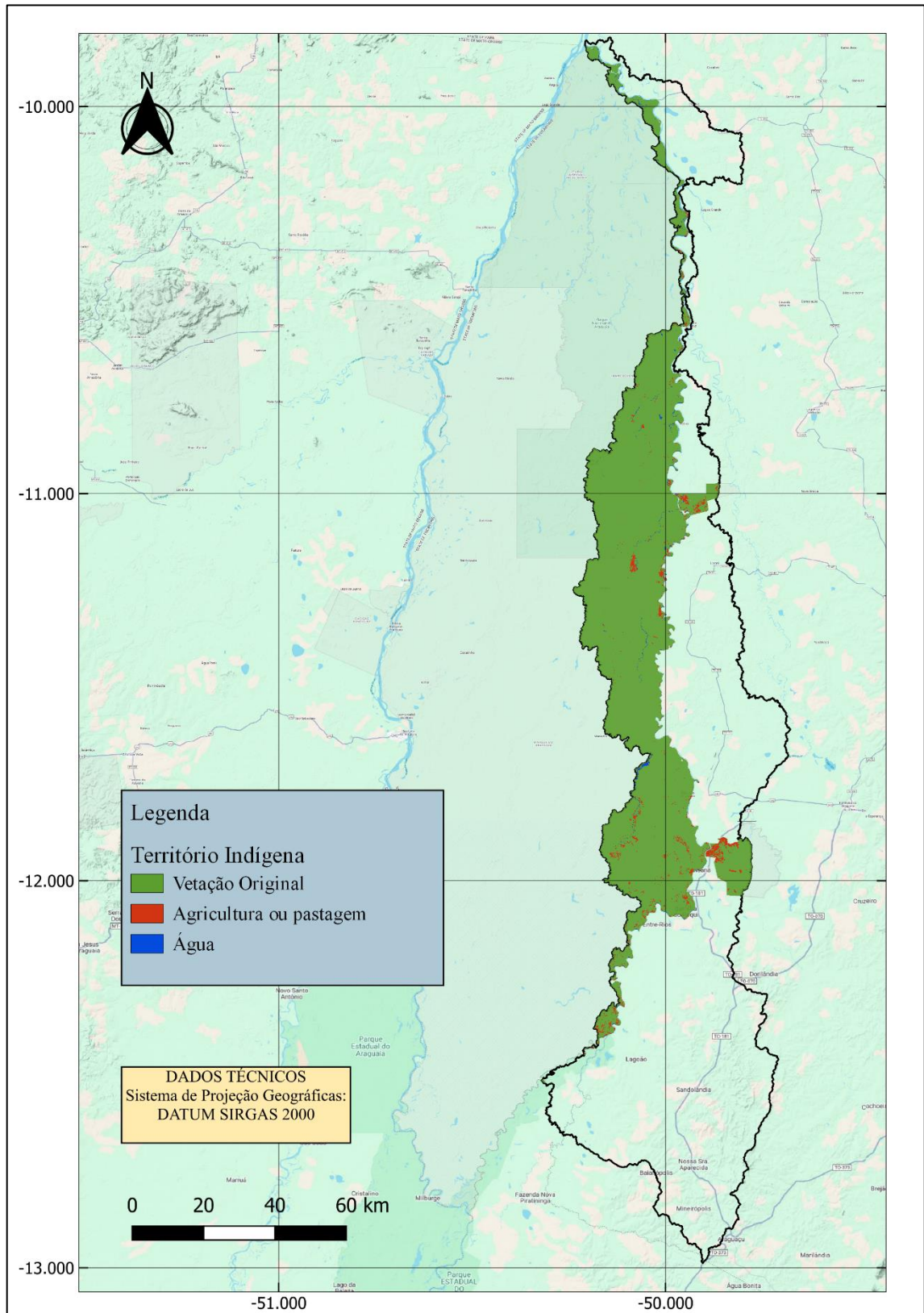
O território situado na margem esquerda do Javaés pertence a povos indígenas da região, assim como partes da margem direita, ocupadas pelos Ava-Canoeiro e Kraho-Kanela (Figura 27). A estabilidade das formações florestais nessa área está diretamente associada à predominância dessa vegetação em terras indígenas. Como grande parte da região de influência do rio Javaés está sob jurisdição indígena, as leis de preservação limitam ações antrópicas na bacia. No entanto, mesmo dentro desses territórios delimitados, identificam-se zonas de pastagem e agricultura. Conforme ilustrado na Figura 28, havendo uma sobreposição significativa dessas atividades, principalmente do avanço de pastagens sobre áreas indígenas, conforme evidenciado no mapa de uso e ocupação do solo de 2023.

Figura 27: Território Indígena contido na região de influência do rio Javés.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28: Agricultura e pastagem sobre o território Indígena na região de influência do rio Javaés no ano de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

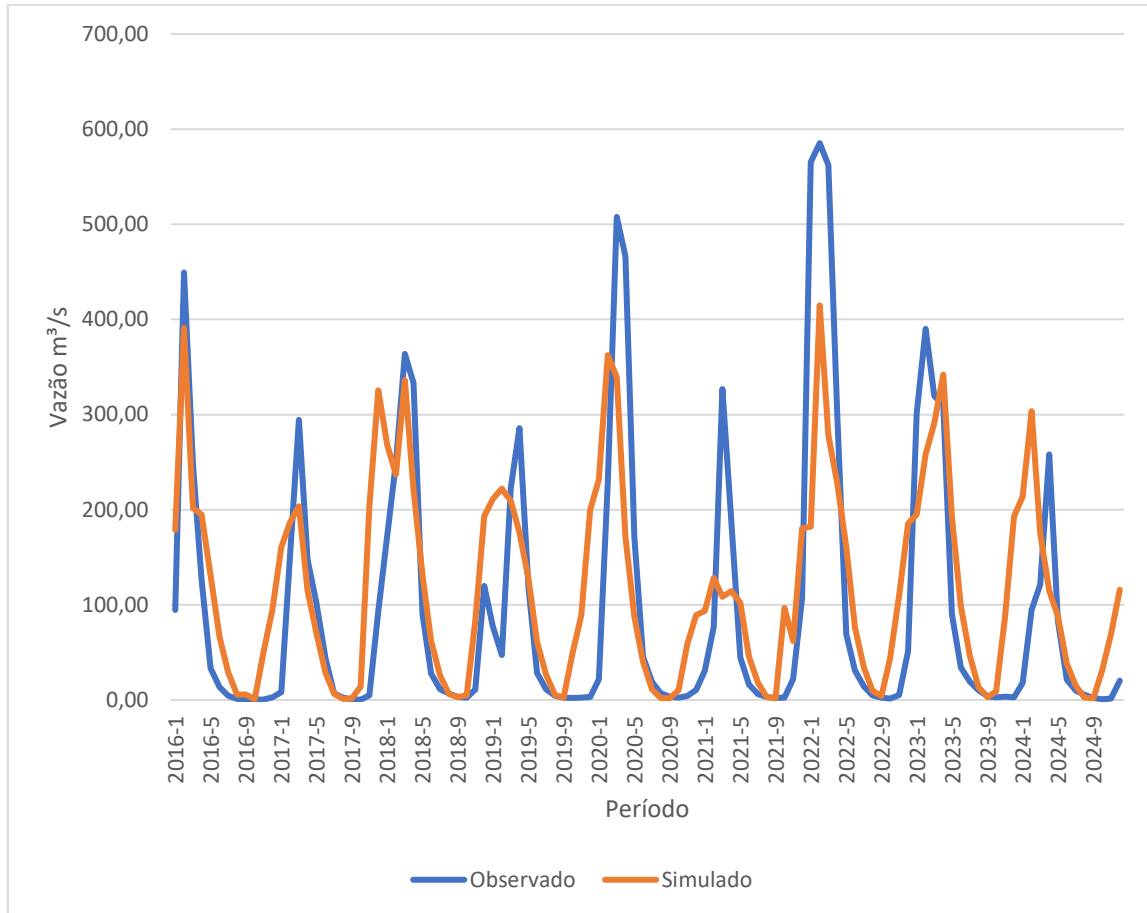
A simulação hidrológica foi executada com base no banco de dados gerado pelas estações de Lagoa da Confusão (A055) que simulou todos os parâmetros climáticos necessários para a rodagem do modelo, já a estação de Formoso do Araguaia (A039), forneceu dados de temperatura, umidade e velocidade do vento, a estação pluviométrica de Sandolândia com código (01249005) e Fazenda COBRAPE (26711000) forneceram dados de precipitação.

Observando a figura 29, em que são comparadas as vazões observadas, aferidas pela estação de Barreira do Pequi, com as simuladas pelo modelo SWAT, percebemos que mesmo antes da calibração o modelo desempenhou boa precisão ao representar os pontos de inflexão, ou seja, a transição entre os períodos chuvosos e os períodos secos, porém, percebemos de maneira geral que o modelo obteve valores subestimados em relação aos picos de vazão, especialmente no ano de 2021. No período de 2021, o modelo interpretou as vazões de forma diferente dos demais anos, apresentando a vazão de forma mais distribuída ao longo do tempo, resultando em um pico de vazão inferior, possivelmente devido à falha na interpolação de dados pluviométricos entre as estações de Fazenda COBRAPE e Lagoa da Confusão, que registraram divergências na precipitação média, respectivamente 0 mm e 9,13 mm em junho (tabelas 3 e 6). O gráfico ainda nos permite extrair os valores médios de vazão, para a série histórica avaliada, a vazão média do rio Javaés, observada pela estação no trecho de Barreira do Pequi foi de 98,67 m³/s, já a média dos valores simulados pelo modelo foi de 116,67 m³/s. O período das maiores vazões está contido entre os meses de janeiro e maio, chegando a um pico observado pela estação, de aproximadamente 562 m³/s no ano de 2022, coincidindo com o a simulação, que apresentou no mesmo ano o maior pico de vazão dentre o período avaliado sendo de 414 m³/s o valor simulado. Entre os meses de junho e setembro a vazão é extremamente baixa, chegando a quase 0 m³/s, atestando a característica sazonal da região representada na simulação.

A figura 30 também traz o gráfico comparativo das vazões observadas e simuladas na estação de Fazenda COBRAPE, com a finalidade de validar a simulação gerada utilizando outro trecho do rio Javaés. Observa-se que visualmente em comparação ao gráfico anterior (Barreira do Pequi) verifica-se uma maior proximidade entre os picos de vazão observados e simulados, bem como na distribuição da vazão no tempo. Cabe salientar que assim como na estação Barreira do Pequi, a simulação vista no trecho da estação Fazenda COBRAPE apresentou uma dissonância no ano de 2021, as causas desta dissonância, podem ter origem na qualidade dos

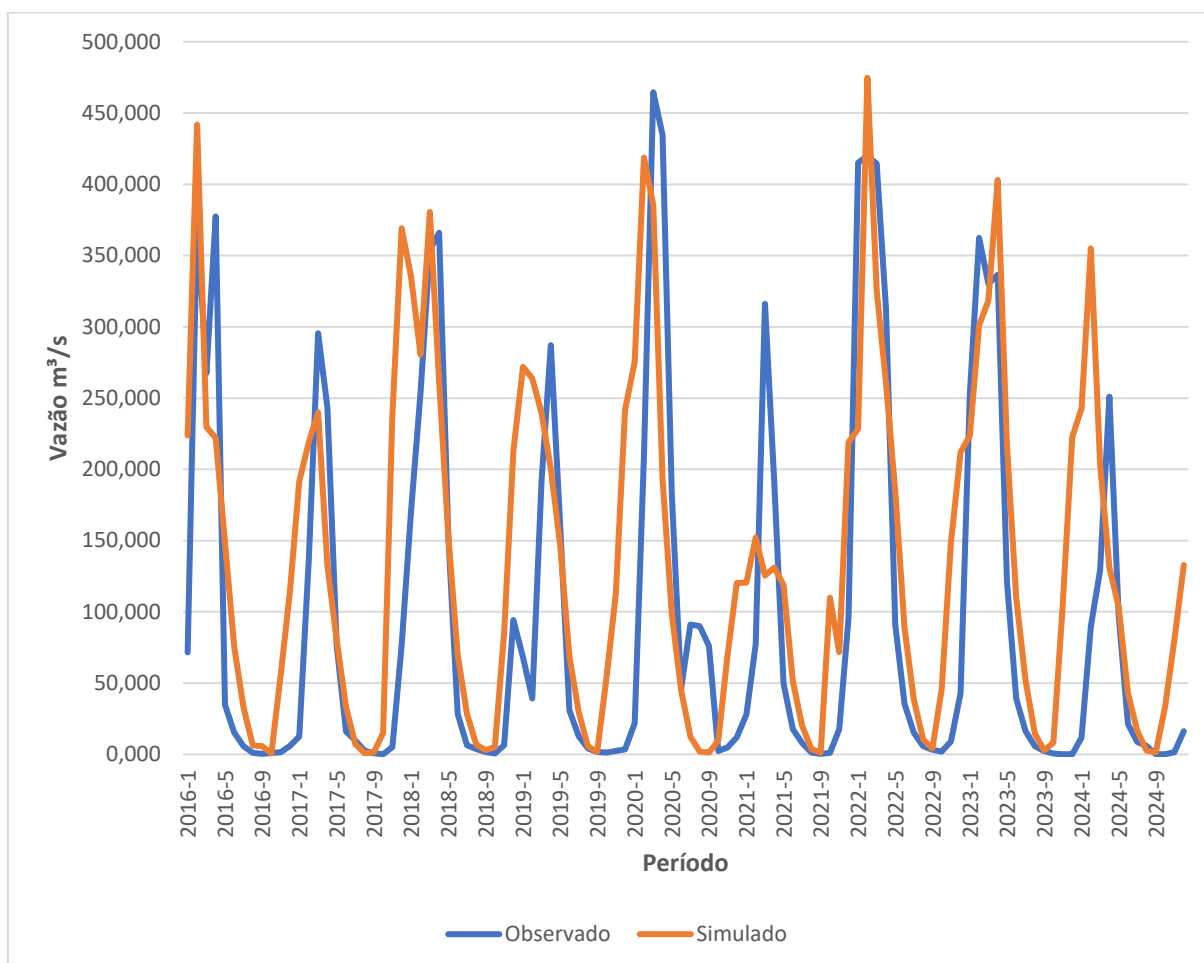
dados de precipitação, a dificuldade na homogeneidade de dados hidrológicos é uma problemática nacional, sendo percebida também no Tocantins, afetando diversos trabalhos que dependem diretamente de variáveis aferidas em campo. A média de vazão observada pela estação de Fazenda COBRAPE entre 2016 e 2024 foi de 98 m³/s, já os valores simulados tiveram por média 135,62 m³/s.

Figura 29: Comparativo entre vazão simulada e vazão observada de Barreira do Pequi



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30: Comparativo entre vazão simulada e vazão observada da estação de Fazenda COBRAPE



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 CALIBRAÇÃO

A calibração foi executada através do software SWAT-CUP, sendo utilizado cerca de 40 horas de processamento de dados pelo computador, com diversas rodagens de parâmetros. O software executa as etapas de calibração e análise de sensibilidade simultaneamente, e possui diferentes opções de algoritmos de otimização. Este trabalho utilizou o algoritmo SUFI2. O SWAT-CUP fornece uma lista com 651 parâmetros, possíveis de calibração do SWAT para que o usuário escolha quais deles quer alterar. Neste trabalho foram adotados 9 parâmetros sendo eles: CN2, que estima o escoamento superficial com base no solo e cobertura vegetal, ALPHA_BF, que controla a resposta da água subterrânea aos rios; GW_DELAY, tempo para a água infiltrar no lençol freático; GWQMN sendo a profundidade mínima de água no aquífero

raso para iniciar fluxo de base; HRU_SLP é a declividade média das unidades de resposta hidrológica (HRUs); EPCO é o fator de Compensação da Absorção de Água pelas Plantas; ESCO é o fator de Compensação da Evaporação do Solo; SOL_AWC é capacidade de Água Disponível no Solo; GW_REVAP é o coeficiente de recarga por capilaridade. (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2011).

A tabela 12 detalha os parâmetros adotados na calibração e os valores da melhor simulação encontrada, tais parâmetros foram adotados com base em trabalhos anteriores que avaliaram o bioma cerrado. O SWAT-CUP permite três formas de alteração de parâmetros, sendo eles: substituição direta, onde o programa faz alterações do valor diretamente; por adição, em que um valor constante definido pelo usuário, é adicionado ao valor inicial do parâmetro; por multiplicação, onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial por porcentagem, para mais ou para menos.

Tabela 12: Calibração de Parâmetros

Parâmetro	Forma de alteração	Melhor Simulação
CN2	Substituição direta	0.129
ALPHA_BF	Substituição direta	0.652667
GW_DELAY	Substituição direta	60.7999
GWQMN	Substituição direta	1.71667
HRU_SLP	Substituição direta	0.00066
EPCO	Substituição direta	0.86333
ESCO	Substituição direta	0.263
SOL_AWC	Substituição direta	0.915
GW_REVAP	Substituição direta	0.278

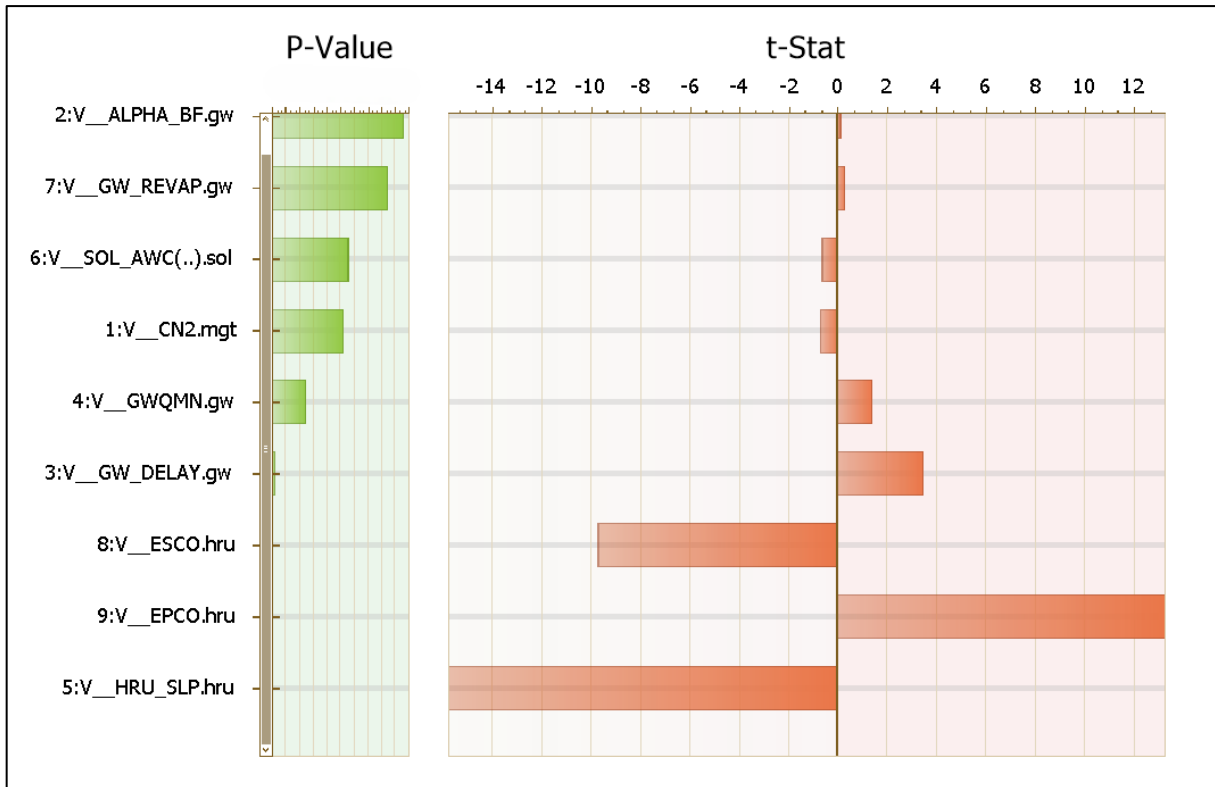
Fonte: Elaborado pelo autor.

O software SWAT-CUP permite a análise da sensibilidade simultaneamente a calibração, para isso, a função objetivo definida pelo usuário é aplicada a cada parâmetro em cada simulação. Quanto mais houver variações no valor da função devido a alterações nos valores do parâmetro, mais sensível é o parâmetro (CARVALHO, 2014).

Na análise da sensibilidade global, a importância dada a cada parâmetro na simulação é apontada em formato gráfico, através da utilização de um teste de hipóteses que utiliza uma distribuição t de Student. Essa distribuição é muito similar à distribuição normal, com a diferença que o desvio padrão da população nesse tipo de teste é desconhecido e deve, portanto, ser estimado (CARVALHO, 2014). As informações fornecidas pelo P-Value determinam a

significância da sensibilidade, os valores mais próximos a zero indicam maior significância. O t-Stat fornece uma medida da sensibilidade, as maiores barras indicam maior sensibilidade.

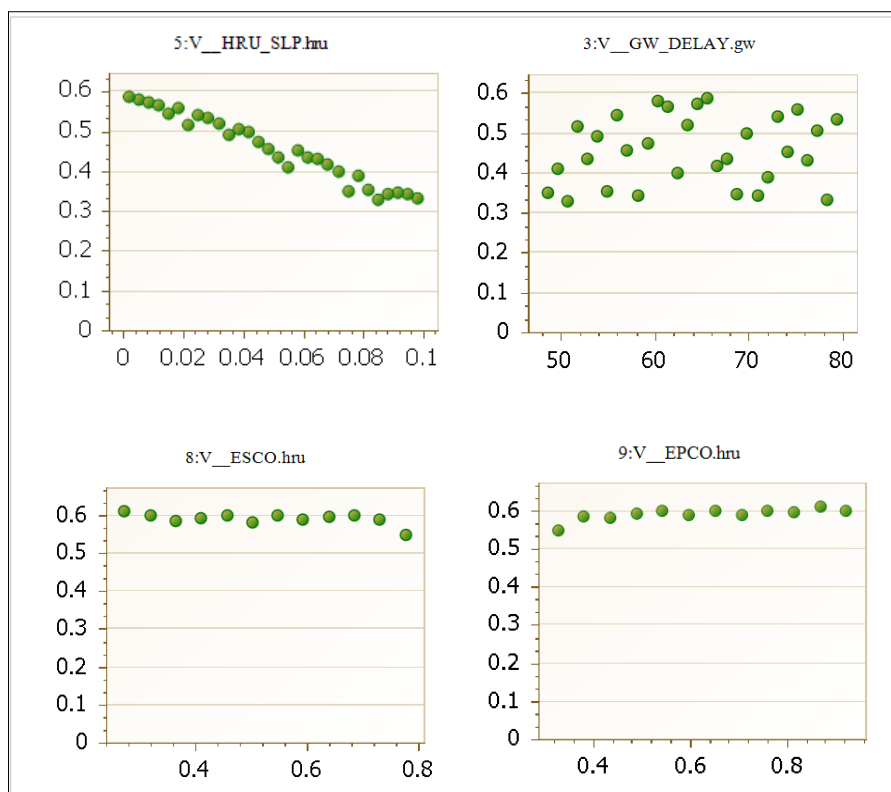
Figura 31: Análise de sensibilidade dos parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor, extraído do SWAT-CUP.

Observando o gráfico percebe-se que os parâmetros GW_DELAY, ESCO, EPCO e HRU_SLP foram amplamente os mais relevantes no processo de calibração. O parâmetro ALPHA_BF apresentou a menor significância na simulação. O SWAT-CUP ainda fornece gráficos de dispersão para cada parâmetro, os pontos dispostos nos gráficos, representam os valores testados do parâmetro versus função objetivo. Esses gráficos auxiliam na compreensão do conceito de sensibilidade. A figura 32, mapeou os parâmetros mais relevantes do modelo, sendo o valor do parâmetro substituído (eixo x) e o coeficiente NS (eixo y) para ilustrar a sensibilidade relativa de cada parâmetro associado ao NS e também demonstrar a distribuição dos pontos de amostragem.

Figura 32: Relação dos parâmetros com o coeficiente NS

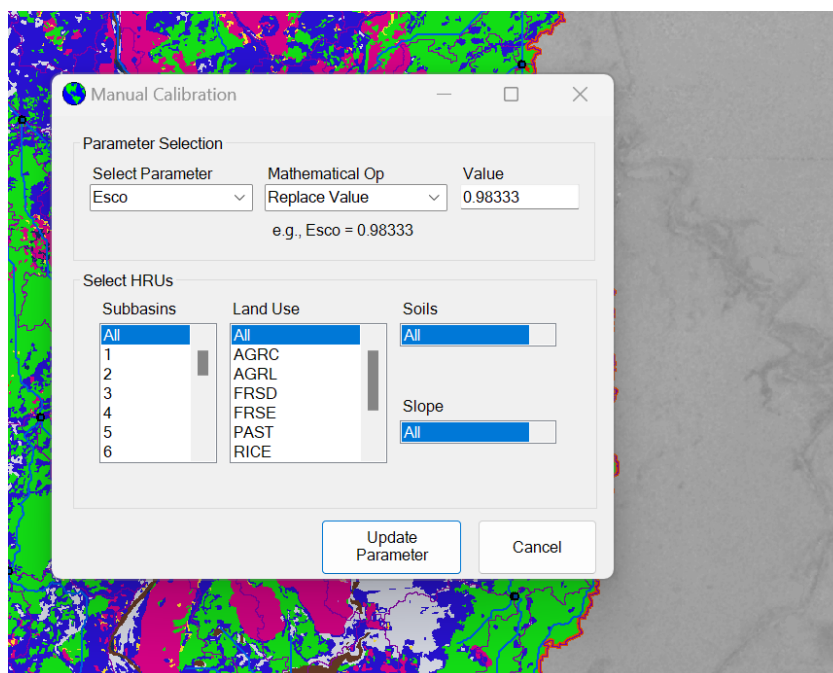


Fonte: Elaborado pelo autor, extraído do SWAT-CUP.

A análise do gráfico do parâmetro HRU_SLP revela um comportamento característico. Com a substituição do parâmetro para valores positivos maiores, observa-se uma redução no desempenho da função objetivo, acompanhando o decréscimo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) conforme os valores se deslocam para a direita. Quanto ao parâmetro GW_DELAY, verifica-se maior flutuação nos resultados, porém com desempenho otimizado da função objetivo no intervalo entre 60 e 70, onde os pontos apresentaram maior consistência. Os parâmetros ESCO e EPCO exibem padrões distintos em seus gráficos. Enquanto o ESCO mostra uma diminuição gradual no desempenho à medida que seus valores aumentam, o EPCO segue o comportamento oposto, com eficiência crescente em relação ao coeficiente NS para valores superiores a 0,8, indicando melhor ajuste do modelo nessa faixa. Esses resultados destacam a sensibilidade de cada parâmetro e sua influência no desempenho global da simulação.

Após a calibração do SWAT o modelo foi novamente rodado com os novos parâmetros e foram obtidos novos resultados das variáveis hídricas (figura 33)

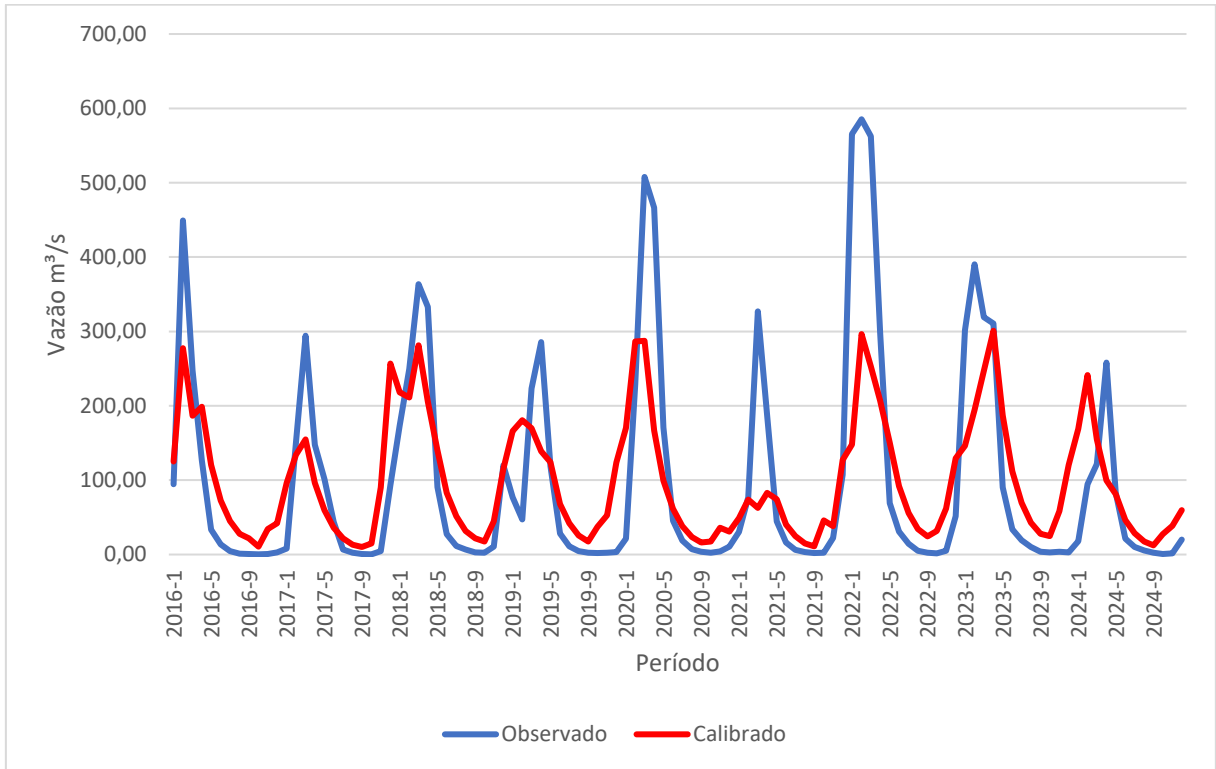
Figura 33: Inserção dos novos parâmetros no modelo



Fonte: Elaborado pelo autor.

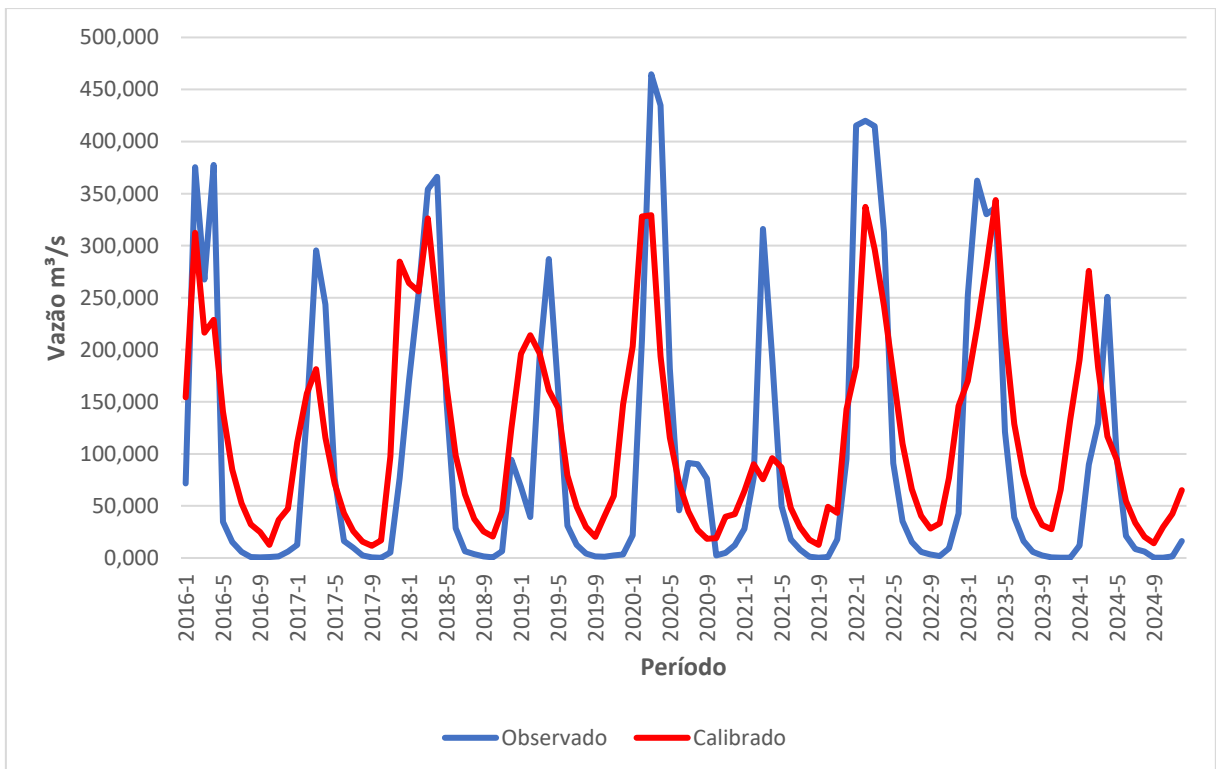
As Figuras 34 e 35 apresentam as vazões simuladas pelo modelo SWAT após o processo de calibração, evidenciando um ajuste significativo no tempo de resposta da bacia às precipitações. Observa-se que, após a calibração dos parâmetros, os picos de vazão simulados passaram a ocorrer em momentos mais próximos aos picos observados nas estações fluviométricas, o que resultou em um desempenho hidrológico superior do modelo. O aumento de GW_DELAY e o ajuste de ALPHA_BF, indica que a calibração promoveu o retardamento do escoamento subterrâneo e suavizou a resposta hidrológica, reproduzindo de maneira mais realista o atraso natural das vazões na bacia. Essa melhoria pode estar associada à influência de barramentos e pequenos reservatórios distribuídos ao longo do rio Javaés, que atuam como elementos de regularização do fluxo, armazenando água durante os eventos de cheia e liberando-a gradualmente nos períodos subsequentes. Essa condição antrópica tende a atrasar a propagação dos picos de vazão observados, o que explica a diferença temporal entre as séries simuladas e observadas antes da calibração. Assim, esse comportamento adicionado por meio dos ajustes nos parâmetros hidrológicos, melhorou a representação do regime de escoamento, refletida nos melhores índices de desempenho (NS, R² e PBIAS).

Figura 34: Comparativo: vazão simulada calibrada e vazão observada em Barreira do Pequi



Fonte: Elaborado pelo autor

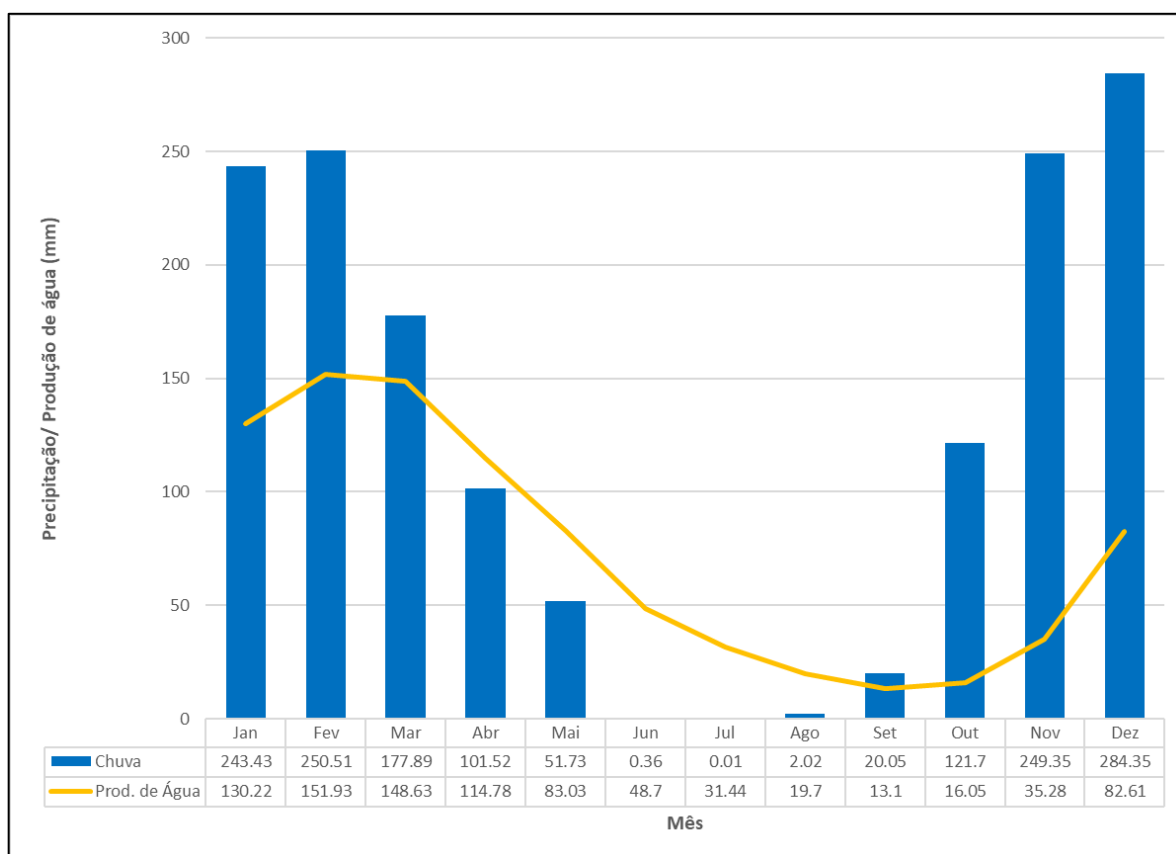
Figura 35: Comparativo: vazão simulada calibrada e vazão observada em Fazenda COBRAPE



Fonte: Elaborado pelo autor

O ciclo hidrológico resultante da simulação após a calibração apontou que a precipitação anual simulada na bacia foi de 1.497,2 mm, valor esse muito condizente com as médias anuais registradas na região, a evapotranspiração real foi de 629,4mm representando cerca de 42% do volume precipitado na bacia, o escoamento lateral (192,83 mm) e o fluxo de base (638,43mm) compõem a maior parte do fluxo escoado; cerca de 44% do volume precipitado percola sendo 671,81 mm e a recarga para o aquífero profundo 33,59 mm. O gráfico da Figura 36, demonstra a relação da precipitação com a produção de água pela bacia gerados pela simulação no SWAT. Os índices de produção de água pela bacia estão relacionados com o escoamento superficial e com o fluxo de base, retrata a capacidade da bacia em distribuir água aos canais da rede de drenagem. É possível observar a característica sazonal da bacia contrastando o período húmido com o período seco, as maiores precipitações estão concentradas entre os meses de novembro e março, a maior precipitação registrada está contida no mês de dezembro cerca de 284 mm, o período seco se concentra entre os meses de maio e setembro, o mês de julho registrou a menor média de precipitação praticamente 0 mm. Infere-se pelo gráfico, que a produção de água no período seco ocorre em função do escoamento lateral e fluxo de base.

Figura 36: Relação precipitação com produção de água na Bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A etapa de análise do desempenho do modelo é fundamental para atestar a capacidade de representação da simulação. Uma variada gama de trabalhos atesta que a utilização de um período muito curto para a calibração pode gerar grande nível de incerteza, para a validação da simulação foi utilizado o período de dados compreendidos entre 01/01/2022 até 31/12/2024. Esse trabalho se baseou em três índices estatísticos, o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NS) e o percentual de tendência (PBIAS). A tabela 13 mostra os valores dos índices obtidos na calibração e validação, também é descrita a classificação da performance da simulação de acordo com a tabela 7 do capítulo 3.6.

Tabela 13: Índices estatísticos comparativos da calibração e validação

Estação	Critérios de Eficiência Estatística			Classificação de Performance
	Índice	Calibração	Validação	
Barreira do Pequi	R^2	0.59	0.57	Satisfatório
	NS	0.56	0.49	Satisfatório
	PBIAS	-4.01	7.55	Satisfatório
Fazenda COBRAPE	R^2	0.60	0.70	Satisfatório
	NS	0.55	0.62	Satisfatório
	PBIAS	-14.16	-19.02	Satisfatório

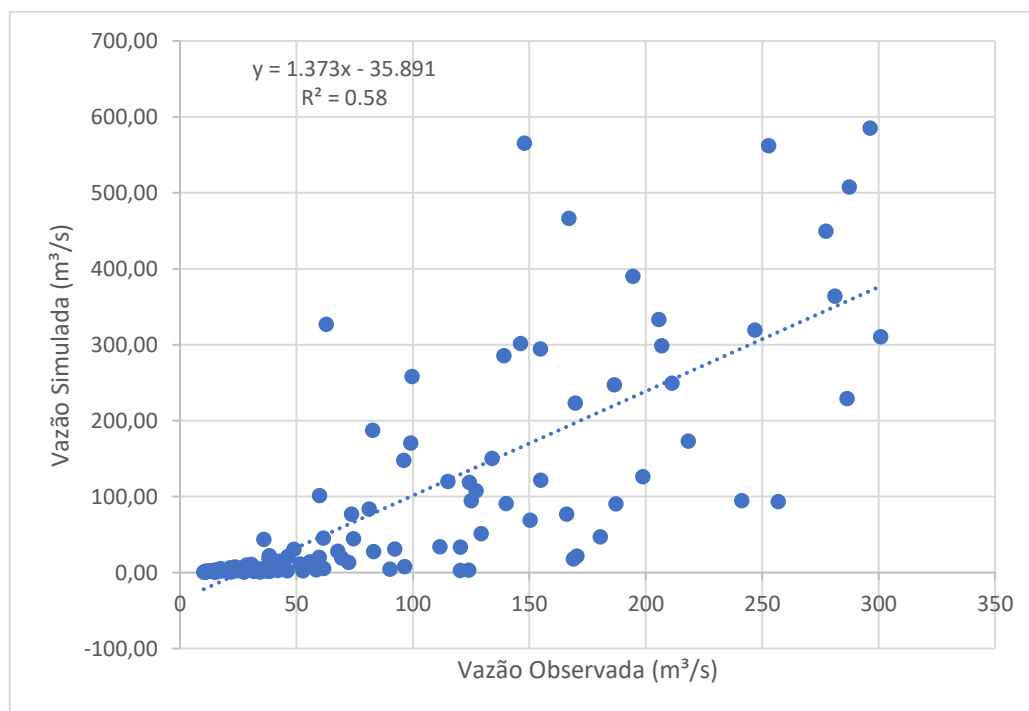
Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre todos os índices avaliados, apenas um ficou ligeiramente abaixo do padrão satisfatório apontado por Moriasi et al. (2007), o índice NS da calibração da estação de Barreira do Pequi que atingiu 0,49, muito próximo ao padrão definido de 0,5. Entretanto, Green e Van Griensven (2008) consideraram que para uma calibração com dados diários valores de NS superiores a 0,4 e R^2 superiores a 0,5 são considerados satisfatórios para a simulação, dessa forma podemos considerar que todos os índices avaliados atingiram ao menos o padrão satisfatório de performance. Portanto, os índices atestam que o SWAT foi capaz de simular adequadamente as vazões da bacia.

Sarmento (2010) aplicando o modelo SWAT na bacia de Descoberto no Distrito Federal obteve coeficiente NS na calibração de 0,62 e na validação 0,34. Notter et al. (2007), aplicando um modelo semi distribuído, baseado no método CN-SCS, para a região do Monte Kenya na África, obtiveram coeficiente NS de 0,51. Carvalho (2014) na bacia de Jardim, obteve na fase de calibração NS de 0,52 e na validação NS de 0,49.

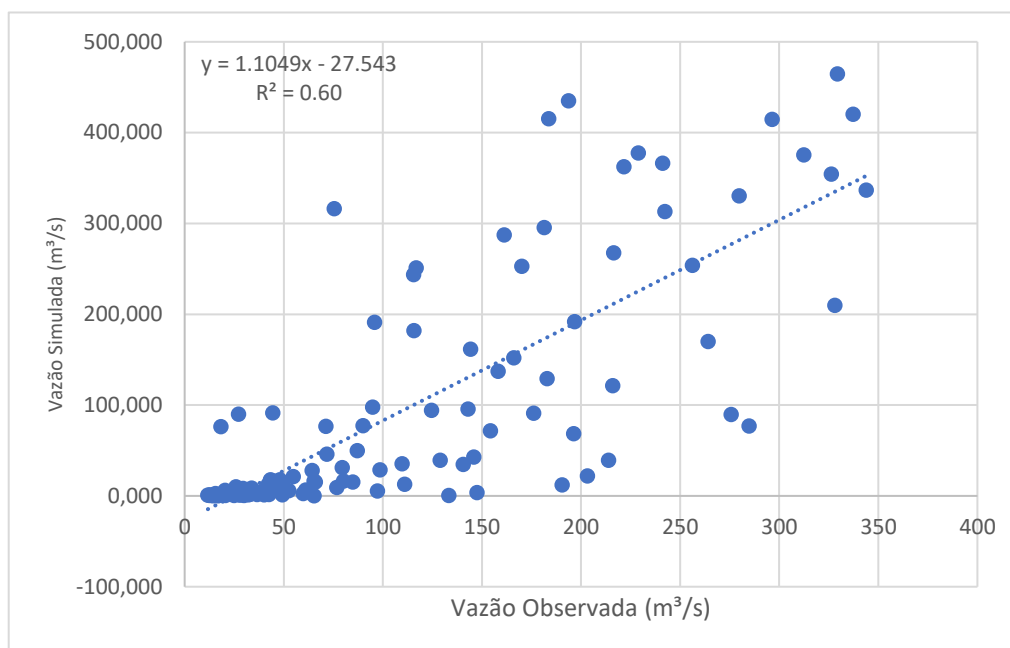
As figuras 37 e 38 demonstram a relação entre vazão observada e vazão simulada. Depreende-se do gráfico que os valores de vazão quando menores, próximo a 0, relativos ao período mais seco do ano, são melhores representados pelo gráfico, havendo uma maior similaridade entre o par ordenado formado pelo valor simulado e observado, tendo em vista a maior proximidade da reta de tendência. Em relação aos valores de vazão mais altos que representam o período mais chuvoso da região, percebe-se maior flutuação e distância da reta de tendência. Isso ocorre devido o sutil adiantamento ou atraso da vazão simulada, fazendo com que os pares formados pelos dados simulados e observados destoem, esse efeito é facilmente observado pelo deslocamento para esquerda ou direita dos picos de vazão no gráfico das figuras 34 e 35.

Figura 37: Gráfico de dispersão entre os valores de vazões observadas e simuladas pelo SWAT com calibração de parâmetros – Estação Barreira do Pequii



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38: Gráfico de dispersão entre os valores de vazões observadas e simuladas pelo SWAT com calibração de parâmetros – Estação Fazenda COBRAPE



Fonte: Elaborado pelo autor

A estação de Fazenda COBRAPE demonstrou o comportamento mais homogêneo em comparação a estação de Barreira do Pequi, que teve as vazões máximas subestimadas afetando o seu desempenho. Percebe-se na simulação do SWAT a característica da rápida resposta da bacia hidrográfica aos grandes eventos de precipitação, fazendo com que o pico de vazão ocorresse antes do observado, esse fator foi determinante no desempenho do modelo. O adiantamento dos picos de vazão simulados reflete a baixa capacidade de infiltração dos plintossolos cerca de 74,5% da bacia, podendo estar ligada com as propriedades físico-hídricas dos perfis de solo adotados neste trabalho, tendo em vista que os valores de referência extraído do trabalho de Lima et al. (2013) apesar de se enquadrar nas características da região avaliada, podem não representar a totalidade da bacia.

4.6 RESPOSTA HÍDRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO JAVAÉS ÀS ALTERAÇÕES OCORRIDAS ENTRE 2004 E 2023

Os impactos gerados pelas alterações no uso e ocupação na região de influência do rio Javaés, em relação às vazões, foram ilustrados com base na vazão simuladas para os anos de 2004 e 2023 e seus respectivos mapas de uso e ocupação. As tabelas 14 e 15 retratam esse comparativo nos trechos de Barreira do Pequi e Fazenda COBRAPE.

Tabela 14: Vazão média no trecho de Barreira do Pequi, para os cenários de 2004 e 2023

	Vazão média (m ³ /s)	Varição da vazão (m ³ /s)
Uso e ocupação 2004	98.01	-
Uso e ocupação 2023	98.28	+ 0.27

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15: Vazão média no trecho de Fazenda COBRAPE, para os cenários propostos de 2004 e 2023.

	Vazão média (m ³ /s)	Varição da vazão (m ³ /s)
Uso e ocupação 2004	113.61	-
Uso e ocupação 2023	113.93	+0.32

Fonte: Elaborado pelo autor

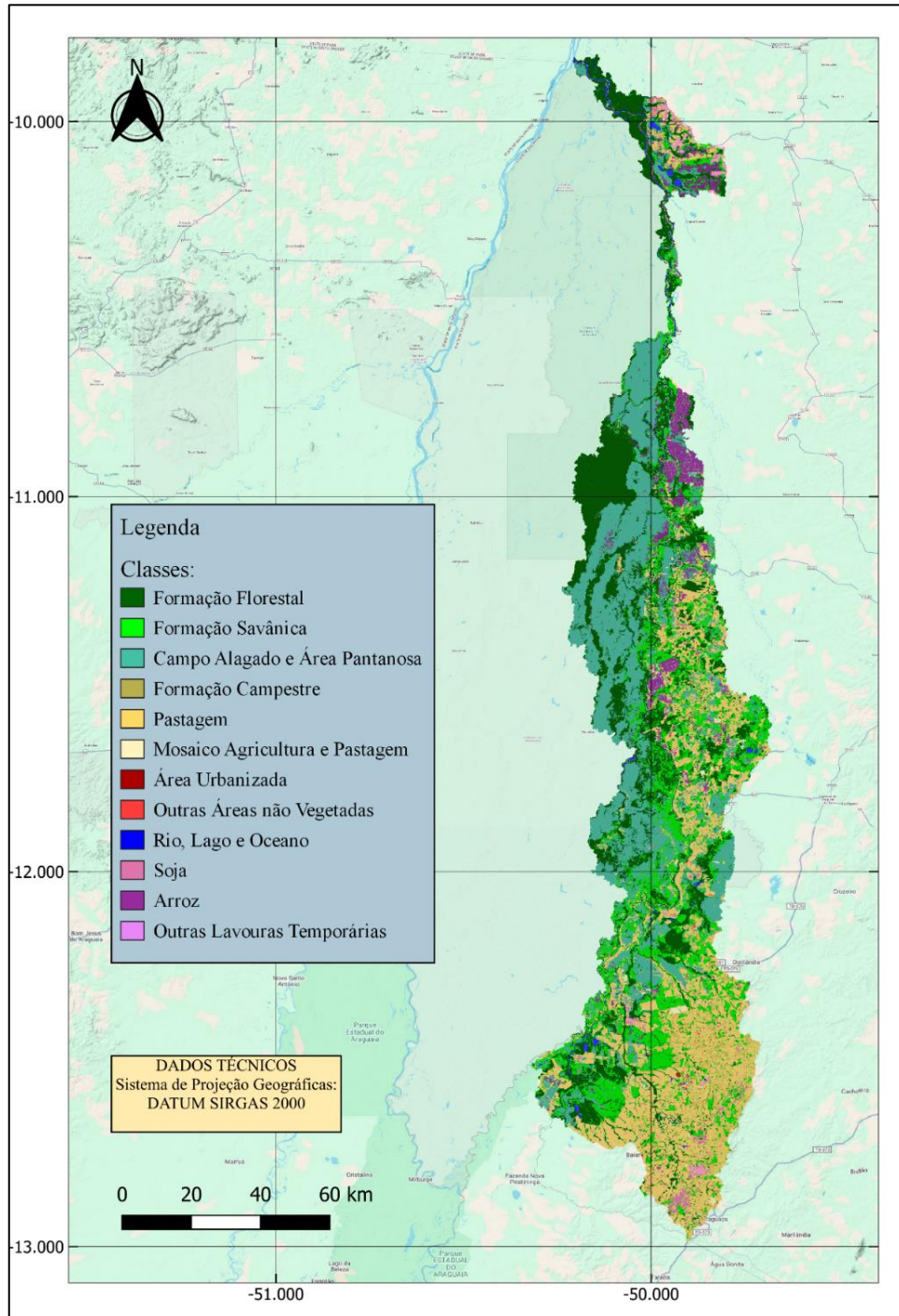
Tendo em vista os resultados obtidos, percebe-se que houve pequeno crescimento das vazões médias em ambos os trechos do rio Javaés, para o ano de 2023 em comparação ao uso e cobertura de 2004. O aumento de 0.27 m³/s e 0.32 m³/s na vazão média coincide com a redução de 21,03% do Cerrado (Tabela 9), isso sugere que a compactação do solo em áreas de pastagem 22,01% em 2023 acelerou o fluxo para os canais. A conversão de formações savânicas, que possuem maior capacidade de infiltração e retenção de água do que áreas agrícolas ou pastagens compactadas, para usos que promovem o escoamento superficial rápido, pode resultar em um aumento da vazão total em detrimento da infiltração e recarga de aquíferos. Isso significa que, enquanto o volume total de água que passa pelo rio pode aumentar, a capacidade da bacia de armazenar água e liberá-la gradualmente, especialmente durante os períodos de seca, pode ser comprometida. Este fenômeno, é uma consequência comum da degradação da cobertura vegetal e da compactação do solo, levando a um regime com picos mais altos e secas mais pronunciadas.

Contudo, o resultado foi um discreto aumento da vazão média, o que, em termos absolutos, não representa uma alteração significativa no regime hídrico do rio. A variação de menos de 0,3 m³/s em ambos os trechos aponta para uma relativa estabilidade da vazão média anual, apesar das significativas mudanças no uso e cobertura do solo. Este cenário sugere que os efeitos da alteração da paisagem podem estar, num primeiro momento, sendo compensados por outros fatores hidrológicos ou mesmo pela escala temporal da análise.

4.7 SIMULAÇÃO DE CENÁRIO NO DINAMICA EGO

Para a avaliação do comportamento hidrológico da bacia em um cenário prognóstico, o modelo Dinamica EGO foi empregado para projetar o uso e ocupação da terra para o ano de 2043 (Figura 39), com base nas dinâmicas de transição observadas no período histórico de 2004 a 2023.

Figura 39: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.



Fonte: Elaborado pelo autor

A simulação para 2043 aponta para uma continuidade e intensificação das tendências de mudança de uso do solo observadas historicamente. Prevê-se um aumento significativo nas áreas dedicadas à agricultura: o cultivo de arroz passaria de 1,23% em 2023 para 3,64% em 2043, e a soja de 0,63% para 1,60%. As áreas de pastagem também continuariam a se expandir, de 22,01% para 25,23%. Em contrapartida, as áreas de Formação Savânica (Cerrado) sofreriam uma nova redução, passando de 25,34% para 19,91%. As áreas de campo alagado, por sua vez, teriam uma leve diminuição de 25,60% para 24,65%. A Tabela 16 apresenta a projeção da área de cerrado, campos e agricultura no cenário proposto para 2043.

Tabela 16: Área de cerrado, campos e agricultura no cenário proposto.

Alterações nos Usos e Coberturas da Bacia do Javaés (%)					
	Arroz	Soja	Pasto	Campo Alagado	Cerrado
2023	1.23%	0.63%	22.01%	25.60%	25.34%
Simulação 2043	3.64%	1.60%	25.23%	24.65%	19.91%

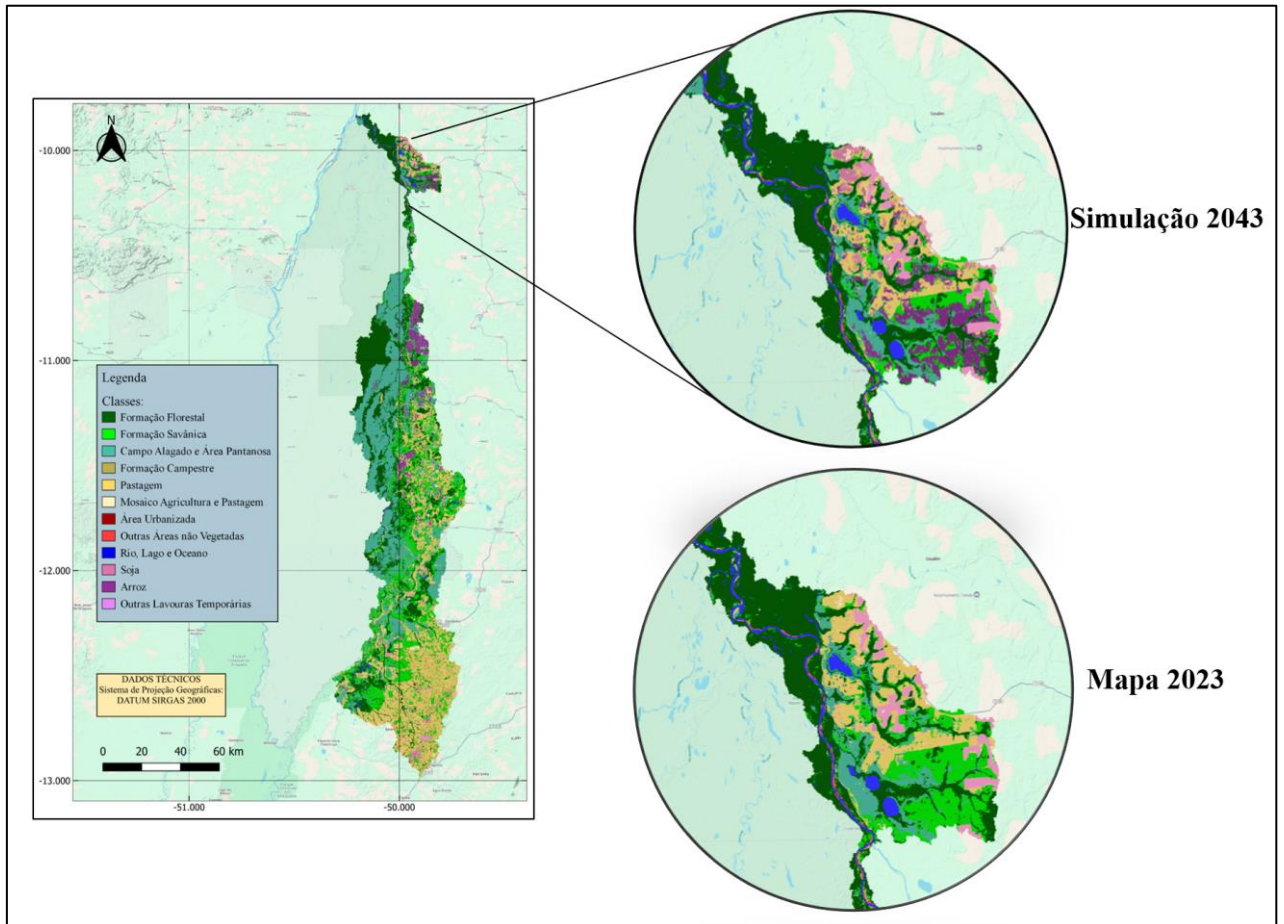
Fonte: Elaborado pelo autor

A projeção futura de uso do solo para 2043 indica uma manutenção das pressões sobre os recursos naturais da região, com a contínua expansão da fronteira agrícola e pecuária em detrimento da vegetação nativa, especialmente da área de cerrado que será reduzida em 21,42% ao longo de 20 anos. A intensificação dessas atividades, particularmente a rizicultura, que aumentará quase três vezes, quando comparada ao ano de 2023, sugere um aumento na demanda de água para irrigação, agravando os conflitos pelo uso dos recursos durante os meses secos de junho a setembro, quando a vazão do Javaés já cai para valores próximos a 1 m³/s em trechos como Barreira do Pequi (Figura 29). A redução da formação savânica também implica uma diminuição da capacidade natural da bacia de regular o ciclo hidrológico e de reter água no solo, os dados do SWAT mostram que as áreas da região do Javaés destinadas a rizicultura escoam superficialmente cerca de 37,6% de todo o volume precipitado. Esse desequilíbrio pode levar a um aumento do escoamento superficial geral da bacia e à diminuição da recarga de aquíferos, impactando a disponibilidade hídrica a longo prazo, existindo também a possibilidade de aumentar o assoreamento do rio Javaés.

A Figura 40, destaca a parte norte da região de influência do rio Javaés no mapa de uso e ocupação da terra prognóstico para 2043 e faz uma comparação com o mapa de 2023. É possível observar o avanço da rizicultura sob as áreas de vegetação nativa, sendo principalmente as vegetações savânicas e de campos alagados as mais afetadas. Em relação ao plantio de soja,

observa-se no mapa prognóstico uma substituição das áreas de pastagem pela cultura de soja essa cultura é de subirrigação ou irrigação por lençol freático, diferindo da sojicultura ocorrida ao sul da região de influência do rio Javaés.

Figura 40: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.



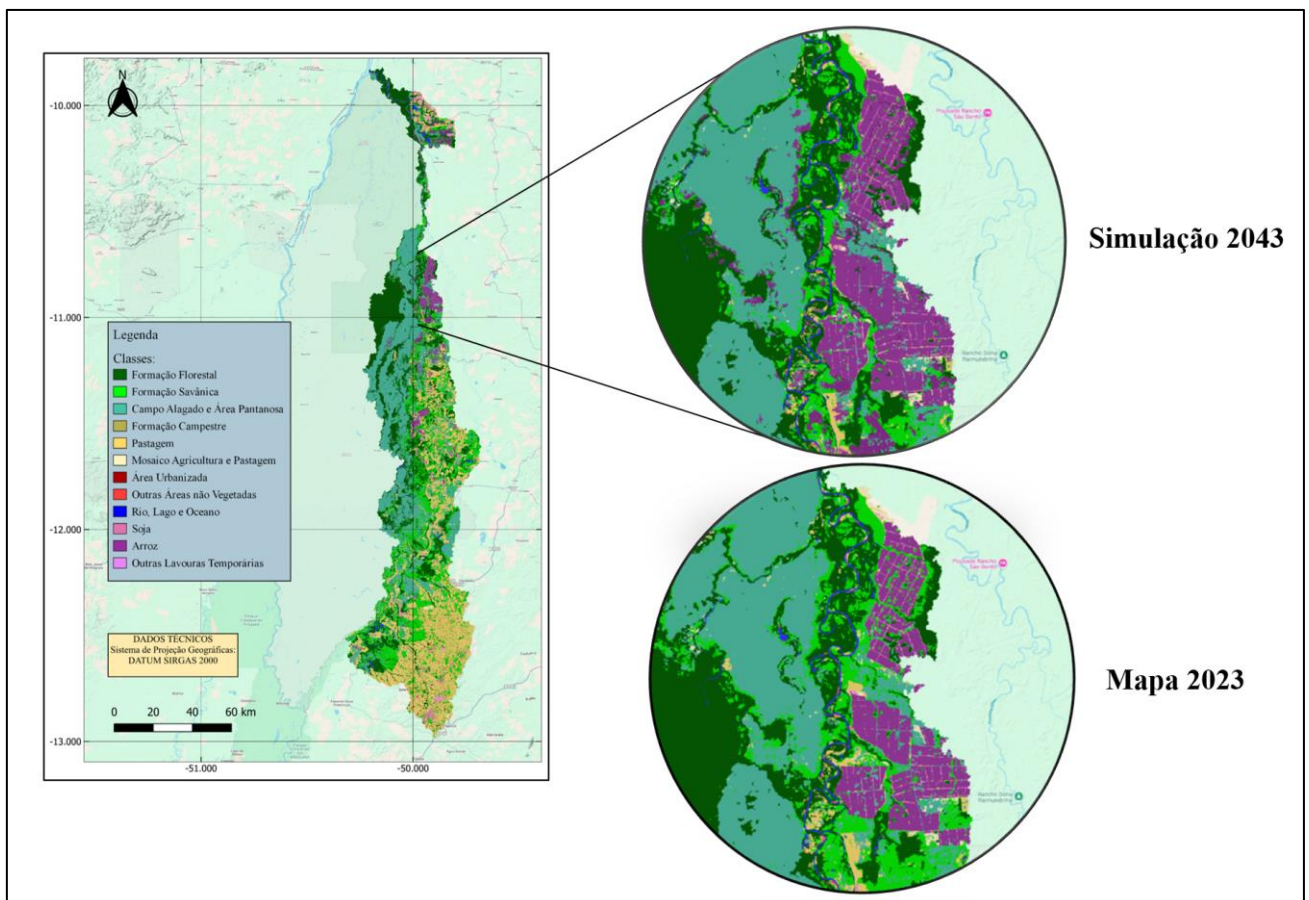
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 41, aponta a porção medial da região de influência do rio Javaés. Atualmente a referida área é amplamente utilizada no plantio de arroz. Observando o cenário prognóstico para 2043, a área de rizicultura seria ampliada em detrimento das áreas de campos alagados, formações savânicas e na substituição das áreas de pastagem. As características de declividade, relevo e culturas anteriores, permitiram que o modelo Dinamica EGO compreendesse que a aptidão agrícola desta área resultaria na significativa dominância da rizicultura para o cenário de 2043.

A Figura 42, destaca a porção sul da região de influência do rio Javaés, sendo uma região mais elevada e de maior declividade, tornando impeditivo o cultivo irrigado. Seguindo as

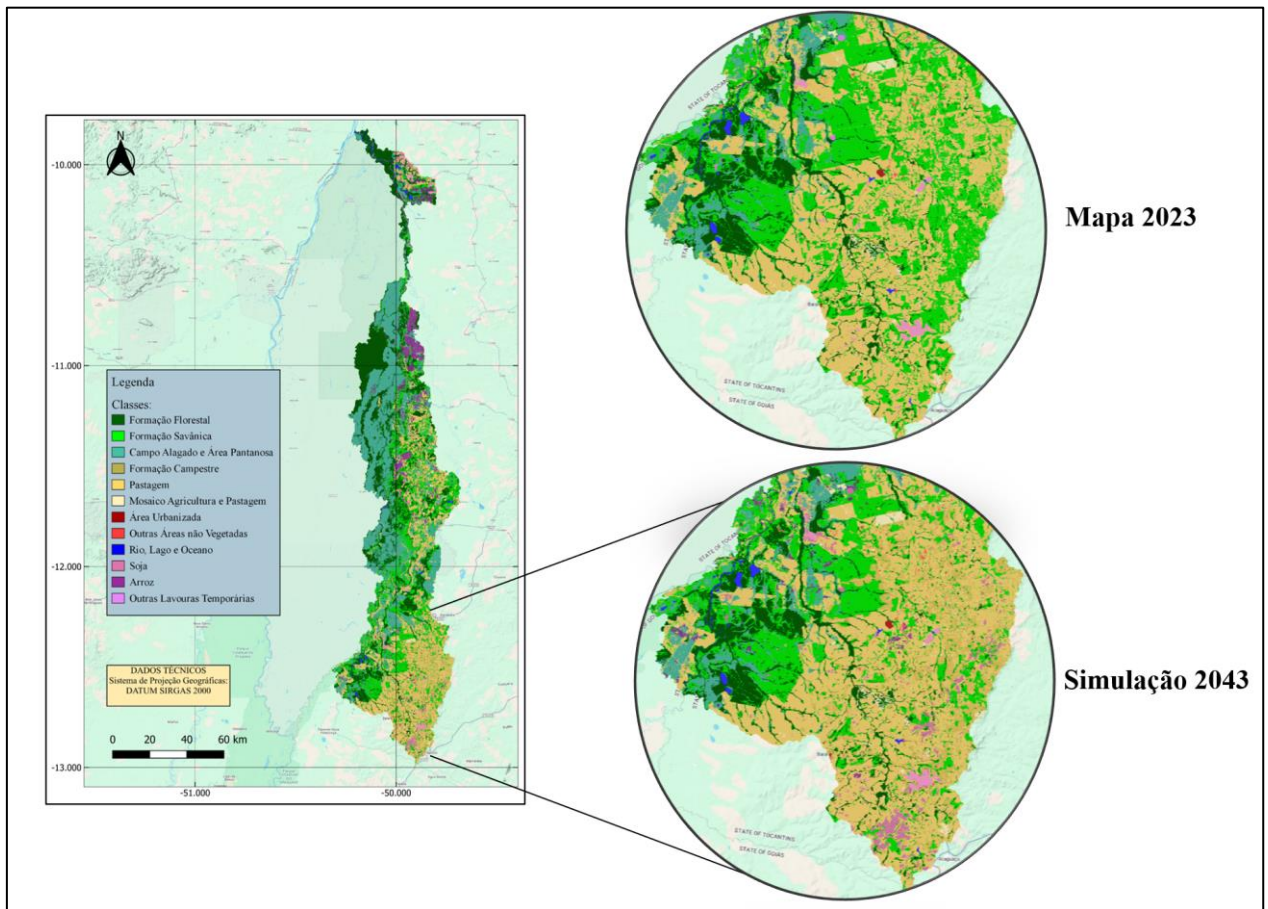
históricas alterações no uso e ocupação da terra desta área, a simulação prevê o contínuo crescimento nas zonas de pastagem resultado do aumento da pecuária de extensão. Porém, observa-se também um avanço do plantio de soja na referida região, diferentemente do plantio de soja encontrado ao norte e centro da região de influência do rio Javaés, a soja encontrada ao sul é denominada soja de sequeiro, cultivada sem auxílio de irrigação na qual a produção está sujeita às variações climáticas e à quantidade de chuva recebida.

Figura 41: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42: Mapa prognóstico de uso e ocupação da terra para o ano de 2043.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.8 IMPACTOS HIDROLÓGICOS NO CENÁRIO PROGNÓSTICO (INTEGRAÇÃO DINÂMICA EGO-SWAT)

A integração dos mapas de uso e ocupação da terra gerados pelo Dinâmica EGO para o cenário de 2043 com o modelo SWAT possibilita simular as características hídricas da bacia sob as projeções futuras de mudança de uso do solo. As Tabelas 17 e 18 apontam as vazões médias dos trechos do rio Javaés localizados em Barreira do Pequi e Fazenda COBRAPE.

A expansão projetada da agricultura e pastagem, acompanhada pela redução do Cerrado, sugere que as tendências hidrológicas observadas entre 2004 e 2023, como o aumento do escoamento superficial e do transporte de sedimentos em áreas convertida, provavelmente se intensificarão. Como demonstrado na análise histórica, a conversão de vegetação nativa para usos agrícolas tende a diminuir a capacidade de infiltração do solo e a aumentar a velocidade do escoamento superficial. Essa alteração no balanço hídrico, com menor retenção de água na bacia e maior volume de escoamento superficial, pode levar a picos de vazão mais acentuados

durante os períodos chuvosos e a uma menor disponibilidade de água nos rios e aquíferos durante as estações secas, devido à recarga reduzida.

Tabela 17: Vazão média no trecho de Barreira do Pequi, para os cenários de 2023 e 2043

	Vazão média (m ³ /s)	Varição da vazão (m ³ /s)
Uso e ocupação 2023	98.28	-
Projeção Uso e ocupação 2043	98.86	+ 0.58

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 18: Vazão média no trecho de Fazenda COBRAPE, para os cenários propostos de 2023 e 2043

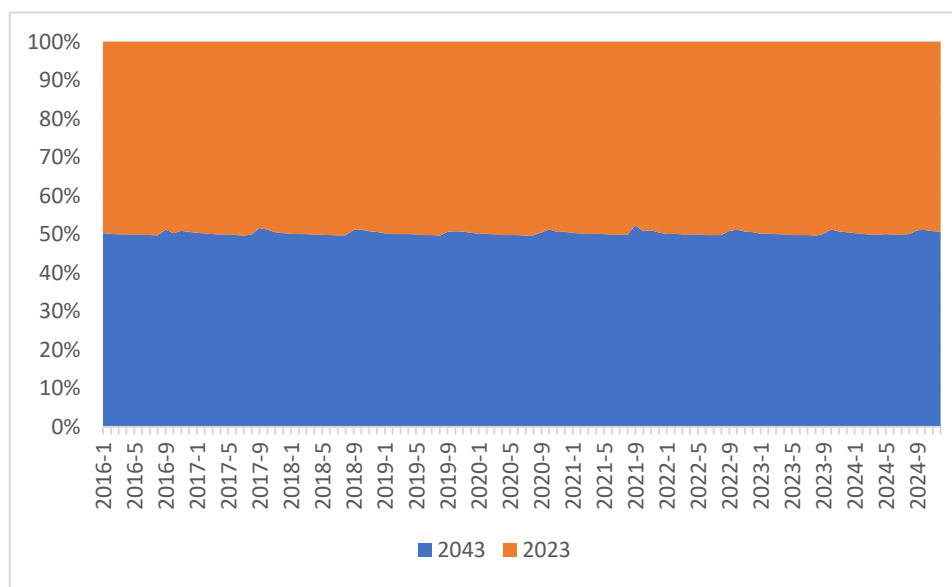
	Vazão média (m ³ /s)	Varição da vazão (m ³ /s)
Uso e ocupação 2023	113.93	-
Projeção Uso e ocupação 2043	114.54	+0.61

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se um aumento de aproximadamente 0.6 m³/s nas vazões médias mensais em ambos os pontos avaliados, demonstrando homogeneidade das alterações ao longo da bacia e o impacto global na mesma, esse fato indica uma menor retenção de água da bacia hidrográfica no cenário de 2043. O cenário de uso e ocupação 2043 apresentou maiores picos de vazão durante o período chuvoso quando comparado a 2023, enquanto no período da seca em diversos momentos as vazões do cenário 2043 foram inferiores as vazões observadas sob a perspectiva de uso e ocupação de 2023. Silva (2013) encontrou resultados semelhantes, havendo aumento na vazão média ao diminuir a área florestada da bacia. O desmatamento reduz a evapotranspiração e aumenta o fluxo do canal, em função do índice de área de folhagem reduzido, menor profundidade e densidade das raízes, além do aumento da compactação do solo.

A Figura 43 demonstra visualmente as diferenças na resposta hídrica simulada para os cenários de 2043 e 2023 submetidos as mesmas condições climáticas, sendo possível verificar os momentos em que os picos de vazão de 2043 suavemente superam os de 2023 e que ao se aproximar do período seco, as vazões se tornam levemente inferiores ao cenário de 2023.

Figura 43: Gráfico comparativo das vazões simuladas para os cenários de 2023 e 2043.



Fonte: Elaborado pelo autor

A projeção para 2043, com o contínuo avanço da agricultura e a retração do Cerrado, sugere que a região de influência do Javaés pode enfrentar desafios em termos de gestão de recursos hídricos. De acordo com a literatura esse resultado era esperado, Wang et al (2013) salienta que, geralmente mudanças superiores a 20% na área de floresta, podem resultar em alterações mensuráveis na vazão do canal. Muito embora a diminuição da área florestada total da região de influência do Javaés, no cenário prognóstico não tenha superado o valor de 20%, influenciado pelos territórios indígenas protegidos, no bioma cerrado houve substituição da vegetação na ordem de 21,42%, diante desse fato foi possível perceber um leve impacto nas vazões do rio Javaés. A diminuição da vazão média anual em cenários de intensificação agrícola, conforme observado em estudos de referência, reforça a importância das áreas de vegetação nativa, como florestas e Cerrado, para a conservação da vazão e a sustentabilidade hídrica da bacia.

Alguns exemplos da literatura corroboram com a hipótese de que a alteração da cobertura vegetal reduz a capacidade de infiltração e aumenta o escoamento superficial. Em um estudo na bacia do rio Paraíba do Sul, no Brasil, Faria et al. (2016) utilizaram o modelo SWAT

para simular na bacia do rio Paraíba do Sul os impactos das alterações do uso e cobertura do solo na vazão. Os resultados demonstraram que a substituição de florestas por áreas urbanas e agrícolas levou a um aumento da vazão de pico e à diminuição das vazões mínimas, evidenciando como a mudança da paisagem intensifica o risco de cheias e períodos de seca. A metodologia de projeção de uso do solo, baseada na comparação de cenários passados período de 1986 e 2015, reforça a importância de monitorar e planejar o uso da terra para a gestão hídrica.

Hoang e Le (2020) investigaram os impactos das mudanças no uso da terra e no clima na bacia do rio Nam Rom, no Vietnã, também usando o modelo SWAT. O estudo mostrou que as mudanças no uso do solo, principalmente o reflorestamento, contribuíram para uma diminuição do escoamento superficial em cerca de -16,9% e da carga de sedimentos em -4,9%. No entanto, a pesquisa destaca que, em termos de impacto geral na hidrologia, as alterações climáticas foram o fator mais significativo. Este trabalho reforça a complexidade do sistema, mostrando que, embora o uso do solo seja crucial, ele interage com outros fatores como o clima, e que o reflorestamento pode ser uma estratégia eficaz para a gestão de recursos hídricos.

Há um consenso entre os trabalhos de que a expansão de áreas agrícolas intensivas tende a aumentar a vazão de pico e o escoamento superficial, enquanto reduzem o tempo de concentração e a capacidade de infiltração. Inversamente, o reflorestamento e a conservação de áreas naturais geralmente resultam na diminuição da vazão de pico e no aumento da infiltração e recarga de aquíferos. Desta forma os estudos convergem na importância de integrar o planejamento do uso do solo com a gestão dos recursos hídricos. As projeções de vazão sob diferentes cenários de uso da terra fornecem subsídios para o planejamento de infraestruturas hídricas, estratégias de conservação de água e desenvolvimento de políticas de uso do solo. A integração realizada neste trabalho entre Dinâmica EGO e SWAT permitiu a exploração de cenários prognósticos de forma dinâmica, ofertando uma ferramenta para tomadores de decisão.

Também é fundamental contextualizar esses resultados considerando dois fatores, primeiro as limitações do SWAT em bacias extensas e a resiliência do sistema frente às mudanças na cobertura vegetal. A aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas extensas, como deste trabalho acima de 10.000 km², apresenta desafios metodológicos significativos. Estudos como de Abbaspour et al., (2015) demonstram alguma dificuldade do SWAT em capturar heterogeneidades espaciais em bacias extensas, especialmente em regiões com transições abruptas entre biomas, como na região do Javaés transicionando entre o cerrado e áreas aluviais. Além disso, a dependência de dados climáticos interpolados introduz

incertezas nas simulações de vazão, principalmente em eventos extremos, secas ou cheias, que exigem resoluções temporais finas. Fatores como processos que não estão incluídos no programa como a erosão eólica, ou processos que mesmo inclusos no programa possuem dados limitados como, barragens, reservatórios, transferência de água e gestão de fazendas, contribuem com as incertezas do modelo.

A bacia do rio Javaés demonstrou relativa resiliência às alterações na cobertura vegetal entre 2004 e 2023, período em que a vegetação nativa, cerrado e formações florestais, foram reduzidas em 8,24%, enquanto áreas agrícolas e pastagens expandiram-se em aproximadamente 36% (Tabela 9). Apesar dessas mudanças, houve apenas uma variação positiva de 0,41 m³/s e 0,5 m³/s nas vazões médias, indicando que o sistema hidrológico apesar de afetado, possui certa capacidade de amortecimento frente a transformações antrópicas. Esse comportamento pode ser atribuído a três fatores principais. A predominância de plintossolos cerca de 74,5% da área, que possuem baixa capacidade de infiltração independentemente da cobertura vegetal, a manutenção de áreas-chave de formação florestal cerca de 22% da bacia, que exercem papel crítico na retenção de sedimentos e regulação do fluxo hídrico, e a própria dinâmica sazonal do Javaés, onde a variabilidade climática natural, com distribuição irregular das chuvas, exerce significativa influência sobre o regime de vazões.

Contudo, essa resiliência tem limites, a projeção para 2043 sugere que, caso a taxa de conversão do Cerrado se mantenha acima de 1% ao ano como indicado na simulação, a perda acumulada de vegetação nativa poderá ultrapassar 15% da área total da bacia, potencializando efeitos negativos como redução da recarga de aquíferos e aumento do escoamento superficial. O resultado da análise hidrológica infere também, que a resiliência da área de influência do Javaés frente as mudanças no uso e ocupação decaiu, sendo verificado um crescimento na ordem de 0.6 m³/s nas vazões médias do rio neste cenário, praticamente o dobro do ocorrido entre 2004 e 2023, por mais que a simulação tenha seguido os padrões históricos dos últimos anos. Entende-se, portanto, que o impacto das alterações no uso e ocupação são acumulativos, que novas mudanças no uso do solo na região de influência do Javaés, causarão impactos superiores aos observados anteriormente.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o modelo hidrológico SWAT foi capaz de representar de forma satisfatória o desempenho hídrico da região de influência, permitindo a simulação das vazões para os períodos analisados e os cenários propostos. A capacidade do modelo em capturar as características sazonais da bacia, com variações de vazão alinhadas à distribuição da precipitação ao longo do ano, foi consistentemente confirmada pelos índices estatísticos de calibração e validação.

A análise do desempenho do modelo, por meio dos coeficientes R^2 , Nash-Sutcliffe (NS) e PBIAS, indicou que, apesar de variações e uma tendência de subestimar picos de vazão, o SWAT atendeu aos critérios de desempenho satisfatório para a simulação de dados diários. A identificação de parâmetros sensíveis, como o GW_DELAY, ESCO, EPCO e HRU_SLP, ressalta a importância dos processos de água subterrânea e evapotranspiração no balanço hídrico da bacia, indicando que as práticas de manejo do solo que afetam a umidade e a cobertura vegetal têm um impacto significativo na hidrologia do Javaés. O formato irregular da bacia pode ter influenciado no desempenho do modelo, segundo a literatura bacias alongadas como a delimitada neste trabalho, tem uma resposta de vazão mais lenta à uma série de precipitações do que bacias circulares, sendo essa uma possível causa da dificuldade encontrada pelo modelo em representar os picos de vazão no período correto.

As alterações no uso e cobertura da terra entre 2004 e 2023 revelaram uma redução de 8,24% na vegetação nativa, impulsionada principalmente pela diminuição da formação savânica (Cerrado), pela expansão contínua de pastagens e pelo crescimento acentuado da agricultura irrigada de arroz e soja. Essa transformação da paisagem, combinada com as características pedológicas, predominância de plintossolos com baixa infiltração e topográficas devido a planície aluvial, contribuiu para um aumento do escoamento superficial e do transporte de sedimentos, especialmente em áreas agrícolas. Embora a vazão média do rio tenha apresentado um leve aumento no período, essa elevação pode indicar uma menor capacidade de retenção de água na bacia, resultando em um regime de fluxo mais rápido e potencialmente reduzindo a disponibilidade hídrica ao longo do ano na bacia hidrográfica.

A projeção do cenário de uso e ocupação da terra para 2043, utilizando o modelo Dinamica EGO, apontou para a continuidade das tendências de expansão agrícola e retração do cerrado. Essa dinâmica futura, demonstrou um crescimento nas vazões médias de

aproximadamente $0,6\text{m}^3/\text{s}$. Esse resultado não é necessariamente positivo, pois é indicativo de menor capacidade de retenção hídrica na bacia. Além dos efeitos hidrológicos, a diminuição das áreas de Cerrado também acarreta impactos secundários sobre a biodiversidade e a estrutura da paisagem, reforçando a necessidade de considerar esses aspectos em análises de manejo e planejamento territorial. Deve-se frisar que os resultados obtidos levaram em consideração apenas as alterações no uso e ocupação da terra, pois o impacto real depende de demais fatores, como informações acerca de outorgas e concessões do uso da água ao longo do Javaés e projeções futuras de alterações climáticas, sendo o uso de tais variáveis sugestões para trabalhos futuros.

A conclusão mais clara é da importância da manutenção das áreas de vegetação nativa para o equilíbrio hídrico na bacia. Entretanto, é inegável a grande aptidão da região oferece para a agricultura e pecuária, atividades que representam a espinha dorsal da economia local e do estado do Tocantins. Uma abordagem puramente conservacionista, que desconsidera essa realidade socioeconômica, seria impraticável e pouco alinhada com as necessidades de desenvolvimento da região. Portanto, as conclusões deste trabalho apontam para um caminho de desenvolvimento sustentável, onde a expansão das atividades agropecuárias podem ocorrer, mas de forma planejada e dentro de limites ecologicamente seguros, pois como observado nos resultados, apesar dos impactos gerados pelas alterações no uso da terra nos últimos anos já serem percebidos hidrológicamente, demonstraram-se brandos.

Em suma, a bacia do rio Javaés apresenta um sistema hídrico cuja resposta às mudanças no uso e ocupação da terra é amplificada por suas características naturais, principalmente sua sazonalidade acentuada. A contínua conversão de vegetação nativa para atividades agropecuárias aponta para um problema não estruturado, tendo em vista os diferentes atores que dependem do rio Javaés, cujos valores pessoais se distinguem. Certamente a busca por uma solução consensual é a indicada, na qual estudos e pesquisas como este podem contribuir positivamente, visando mitigar os impactos negativos e promover uma gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, Karim C. et al. **A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model**. Journal of hydrology, v. 524, p. 733-752, 2015.
- ARNOLD, J. G. et al. **SWAT: Model use, calibration, and validation**. Transactions of the ASABE, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.
- ARNOLD, Jeffrey G. et al. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- BARBOSA, E. D. **Análise da paisagem da bacia hidrográfica do rio Javaés a partir do método GTP–Geossistema, território e paisagem**. Palmas-TO - UFT. 2019.
- BARRELLA. W; PETRERE M. J; SMITH. W. S; MONTANG. L. F. A; **Matas ciliares: Conservação e recuperação. Cap 12, As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes**. EDUSP. 1 ed. p.87-207, 2000. Editores: R.R. Rodrigues & H. F. L. Filho.
- BELIHU, Mamuye et al. **Hydrologic response to land use land cover change in the Upper Gidabo Watershed, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia**. HydroResearch, v. 3, p. 85-94, 2020.
- CARAM, R. O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. Piracicaba, 2010.
- COELHO, G. B.; **Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG)**; 2006; 81f. Dissertação de mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências. Recife, 2006.
- FARIA, A. P. de et al. Impactos das alterações do uso e cobertura do solo na vazão da bacia do rio Paraíba do Sul utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 248–257, 2016.
- FU, Baihua et al. **A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects**. Environmental modelling & software, v. 114, p. 75-97, 2019.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, Andrés et al. **Spatial-temporal dynamics of deforestation and its drivers indicate need for locally-adapted environmental governance in Colombia**. Ecological Indicators, v. 126, p. 107695, 2021.
- GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. **Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds**. Environmental Modelling and Software, v. 23, n. 4. p.422-434. 2008.
- GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O. **Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration**. Journal of Hydrologic Eng, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HOANG, Q. S.; LE, K. B. Application of SWAT model to Assess Land Use and Climate Changes Impacts on Hydrology of Nam Rom River Basin in Vietnam. **ResearchGate**, 2020.

IAC/GESTÃO DE ALTO NÍVEL-GAN. **Estação Fluviométrica de Barreira da Cruz** Disponível em: “<https://gan.iacuft.org.br/monitoramento-mapa/disponibilidade-hidrica?lat=-10.564700&lg=-49.934200&zoom=18.000000>”. 2017. Acesso em: 16/08/2024.

IAC/GESTÃO DE ALTO NÍVEL-GAN. **Estação fluviométrica de Sandolândia** Disponível em:“<https://gan.iacuft.org.br/monitoramento-mapa/disponibilidade-hidrica?lat=-12.532578&lg=-49.932324&zoom=16.351043>”. Acesso em: 16/08/2024.

IAC/GESTÃO DE ALTO NÍVEL-GAN. **Estação Telemétrica Fazenda COBRAPE** Disponível em: “<https://gan.iacuft.org.br/monitoramento-mapa/disponibilidade-hidrica?lat=-11.446895&lg=-49.997467&zoom=12.828889>”. Acesso em: 16/08/2024.

INMET. **Estação Formoso do Araguaia A039** Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/> Acessado em: 12/08/2024.

INMET. **Estação Lagoa da Confusão A055** Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/> Acessado em: 12/08/2024.

KING, K. W., et al. **Soil and Water Assessment Tool - SWAT**. USDA, Agricultural Research Service, 1996. 450p.

LEITE-FILHO, A. T.; SOARES-FILHO, B. S.; DAVIS, J. L.; RODRIGUES, H. O. **Dinamica EGO: Guidebook 2.0**. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto, 2020. ISBN 978-65-01-05910-5.

LIMA, J. E. F.W; SILVA, E. M; STRAUCH, M; LORZ, C. **Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013.

MENDOZA-PONCE, Alma et al. **Impacts of land management and climate change in a developing and socioenvironmental challenging transboundary region**. Journal of Environmental Management, v. 300, p. 113748, 2021.

MORIASI D.N; ARNOLD J. G; VAN LIEW M. W; BINGER R. L; HARMEL R. D; VEITH T. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans ASABE, v.50, p.885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation version 2009**. Temple: Texas Water Resources Institute, 2011.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J.J. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation – version 2005**. SERVICE., G-S. A. W. R. L. – A. R. Texas USA. 525p. 2005.

NOTTER, BENEDIKT & MACMILLAN, LINDSAY & VIVIROLI, DANIEL & WEINGARTNER, ROLF & LINIGER, HANSPETER. (2007). **Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region**. Journal of Hydrology - J HYDROL. 343. 266-278. 10.1016/j.jhydrol.2007.06.022.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. 2004.

RODRIGUES, DANIEL BARTKUS **O Projeto Rio Formoso e a Reprodução Ampliada do Capital no entorno da Ilha do Bananal: concentração da riqueza, exclusão e resistência**. Palmas 2013 155 f.

RODRIGUES, Hermann & BRITALDO, Rodrigues & Filho, Britaldo. (2007). **Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3089-3096

SANTOS, I. ; FILL, H.D.A. ; SUGAI, M.R.B. ; BUBA, H. ; KISHI, R.T. ; MARONE, E. ; LAUTERT, L.F.C. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: LACTEC, v. 1. 372 p. 2001.

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

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE. **Plano de bacia hidrográfica do rio formoso – PBH rio Formoso, no estado do Tocantins**. 2007

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE. **Estudo de pré-viabilidade para aproveitamento hidroagrícola do projeto Javaés, estudo das condições ambientais**. 1995

SERRÃO, E. A. O. **Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas-PA**. Campina Grande-PB, 2018.

SILVA, A. C. **Simulação da descarga fluvial em resposta a mudanças de uso e cobertura da terra: bacia do rio Bonfim, Petrópolis (RJ)**. Rio de Janeiro – UFRJ. 2013.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. **DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier**. Ecological Modelling, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; FOLLADOR, M. **A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models**. Environmental Modelling & Software, v. 43, p. 80-87, 2013.

TEMTIME, Getnet Solomon; ESHETE, Asalf Shumete. **Evaluation of land use/land cover effect on streamflow: a case of Robigumero watershed, Abay Basin, Ethiopia**. Sustainable Water Resources Management, v. 9, n. 4, p. 117, 2023.

TEODORO, V. L. I; TEIXEIRA, D; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista Uniara, n.20, P. 137-157. 2007

TROUPIN, David; CARMEL, Yohay. **Landscape patterns of development under two alternative scenarios: Implications for conservation**. Land use policy, v. 54, p. 221-234, 2016.

TUCCI, C. E. M. e CLARCKE, R. T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TURNER, B. L. et al. **Land-Use and Land-Cover Change Science/Research Plan**. IGBP Report No 35, HDP Report No 7. Stockolm & Geneva. 132p. 1995.

TURNER, M. G. **Landscape Ecology: What is the state of the sciense** . Annual Review of Ecology and Systematic. 36:319–344. 2005.

VERGARA, R. M. O. **Uso da terra, aptidão hídrica e expansão da atividade agrícola no sudoeste do Tocantins: identificação de cenários e fragilidades**. Palmas-TO UFT, 2021.

WANG, S., ZHANG, Z., MCVICAR, T.R., GUO, J., TANG, Y., YAO, A., 2013. **Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: assessing three complementary approaches**. Journal of Hydrology 507, 63-74. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.018