



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL



Ana Carolina Lopes Dias

Estimativa de vazão da bacia do Rio Pará, MG, utilizando o
SWAT+

Ouro Preto

2026

Ana Carolina Lopes Dias

Estimativa de vazão da bacia do Rio Pará, MG, utilizando o
SWAT+

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial para obtenção do título de
Engenheira Ambiental

Orientador: Prof. Dr. ANÍBAL DA FONSECA
SANTIAGO – UFOP

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541e Dias, Ana Carolina Lopes.

Estimativa de vazão da bacia do Rio Pará, MG, utilizando o SWAT+.
[manuscrito] / Ana Carolina Lopes Dias. - 2026.
50 f.: il.: gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Hidrologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. Modelos Hidrológicos. I.
Santiago, Aníbal da Fonseca. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.
Título.

CDU 556

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Carolina Lopes Dias

Estimativa de Vazão do Rio Pará, MG, Utilizando o SWAT+

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Aprovada em 31 de julho de 2026.

Membros da banca

Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Maria Luiza Teófilo Gandini - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. César Falcão Barella - Universidade Federal de Ouro Preto

Aníbal da Fonseca Santiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/08/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Aníbal da Fonseca Santiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/08/2026, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1165139** e o código CRC **5AA1B441**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre fizeram de tudo pela minha educação. Às minhas irmãs, Ana Clara e Ana Elisa, aos meus avós, Walter e Aparecida, e ao Victor, por todo apoio ao longo dessa jornada. À República Feitiço, meu lar durante a graduação.

Ao Guilherme, por todo o incentivo, carinho e companheirismo.

Ao meu orientador, Prof.^a Dr. Aníbal da Fonseca Santiago, pelos ensinamentos, orientação e paciência. Obrigada pelo apoio para que esse trabalho pudesse ser concluído com êxito.

À Escola de Minas e ao DEAMB, pelo ensino de qualidade e por todas as oportunidades acadêmicas vivenciadas.

RESUMO

A crescente demanda por recursos hídricos para atender à expansão agrícola, industrial e urbana na região da bacia do Rio Pará, em Minas Gerais, evidencia a necessidade de estudos sobre a disponibilidade hídrica regional. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estimar a vazão da bacia do rio Pará por meio da aplicação do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+), calibrado a partir de dados observados. Para isso, foram utilizados dados climáticos, pedológicos, hidrológicos e de uso e cobertura do solo, integrados em ambiente SIG e processados no QGIS, além da aplicação do software SWAT+ Toolbox, por meio do algoritmo CALSI, para a calibração e do modelo em passo de tempo mensal no período de 1998 a 2015. A calibração foi realizada na estação fluviométrica Velho da Taipa, obtendo coeficiente de determinação (R^2) de 0,74 e eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) de 0,44, e foi aplicada no exutório da bacia (estação PCH Gafanhoto). Esta apresentou desempenho superior, com R^2 de 0,84 e COE de 0,58, classificando o modelo global como satisfatório de acordo com a literatura. O balanço hídrico médio anual simulado indicou que a evapotranspiração responde por 75% da precipitação (987 mm/ano), seguida pelo escoamento superficial (15%) e pela vazão de base (5%). Identificou-se uma limitação estrutural do SWAT+ na simulação do escoamento de base durante o período de estiagem crítica (agosto e setembro), resultando na subestimativa das vazões mínimas. Conclui-se que a aplicação do SWAT+ constitui uma ferramenta eficaz para representar a sazonalidade e a tendência temporal das vazões da bacia do rio Pará, fornecendo subsídios técnicos relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para o planejamento territorial, ressaltando-se a necessidade de refinamentos futuros na parametrização do aquífero.

Palavras-chaves: Bacias Hidrográficas, Modelagem Hidrológica, Nash-Sutcliffe, Rio Pará, SWAT+.

ABSTRACT

The growing demand for water resources to meet agricultural, industrial, and urban expansion in the Pará River basin region of Minas Gerais highlights the need for studies on regional water availability. In this context, this study aimed to estimate streamflow in the Pará River basin by applying the Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) hydrological model, calibrated using observed data. To achieve this, climatic, soil, hydrological, and land-use/land-cover data were integrated within a GIS environment and processed using QGIS. Additionally, the SWAT+ Toolbox software—specifically the CALSI algorithm—was used to calibrate the model on a monthly time step for the 1998–2015 period. Calibration was performed at the Velho da Taipa gauging station, yielding a coefficient of determination (R^2) of 0.74 and a Nash-Sutcliffe efficiency (COE) of 0.44; the model was then applied at the basin outlet (PCH Gafanhoto station). This application showed superior performance, with an R^2 of 0.84 and an COE of 0.58, classifying the overall model as satisfactory according to the literature. The simulated average annual water balance indicated that evapotranspiration accounts for 75% of precipitation (987 mm/year), followed by surface runoff (15%) and baseflow (5%). A structural limitation of SWAT+ was identified regarding baseflow simulation during the critical dry season (August and September), resulting in an underestimation of minimum flows. It is concluded that the application of SWAT+ serves as an effective tool for representing the seasonality and temporal trends of streamflow in the Pará River basin, providing relevant technical support for sustainable water resource management and land-use planning, while highlighting the need for future refinements in aquifer parameterization.

Keywords: Hydrological Modeling; Nash-Sutcliffe; Pará River; SWAT+; Watersheds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pará, Minas Gerais.....	13
Figura 2: Mapa de Declividade da Bacia do Rio Pará, MG.....	16
Figura 3: Tipos de Solo predominantes na Bacia do Rio Pará, MG.....	17
Figura 4: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Pará, MG.....	18
Figura 5: Mapeamento das Estações Fluviométricas e Hidrometeorológicas.....	24
Figura 6: Discretização das sub-bacias do Rio Pará gerada pelo SWAT+.....	25
Figura 7 — Balanço hídrico médio anual simulado para a bacia do Rio Pará (1998–2015)....	29
Figura 8 — Vazão mensal observada (ANA) e simulada (SWAT+) na estação Velho da Taipa, ponto de calibração (1998–2015).....	30
Figura 9 — Dispersão entre vazão observada e simulada na estação Velho da Taipa, com reta de regressão e índices de desempenho.....	30
Figura 10 — Vazão mensal observada e simulada no exutório da bacia (PCH Gafanhoto), ponto de calibração (1998–2015).....	31
Figura 11 — Dispersão entre vazão observada e simulada no exutório (PCH Gafanhoto), com reta de regressão e índices de desempenho.....	31
Figura 12 — Climatologia mensal da vazão observada e simulada no exutório (PCH Gafanhoto), evidenciando a subestimativa no período de estiagem.....	33
Figura 13 — Efeito da calibração na climatologia mensal da vazão no exutório (PCH Gafanhoto): comparação entre observado, simulado pré-calibração e simulado pós-calibração.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Classificação do desempenho de modelos hidrológicos segundo o COE (escala mensal).....	10
Tabela 2: Classes de declividade (relevo) na área de estudo da bacia do Rio Pará.....	15
Tabela 3: Porcentagem de cobertura e uso do solo da bacia do Rio Pará, MG.....	19
Tabela 4: Parâmetros do solo de entrada no SWAT+.....	21
Tabela 5: Estações hidrometeorológicas utilizadas.....	22
Tabela 6: Estações fluviométricas selecionadas para a verificação do modelo.....	23
Tabela 7 - Parâmetros calibrados, faixas adotadas e valores finais.....	27
Tabela 8 — Índices de desempenho do modelo nas estações fluviométricas (escala mensal, 1998–2015).....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ARS - *Agricultural Research Service*

CALSI - *Calibration by Latin-hypercube Sampling Iterations*

CX - Cambissolo Háplico

FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

URH - Unidades de Resposta Hidrológica

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE-Sisema - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LA - Latossolo Amarelo

LHS - Amostragem por Hipercubo Latino

LV - Latossolo Vermelho

LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo

MDE - Modelo Digital de Elevação

COE - Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe

PVA - Argissolo Vermelho-Amarelo

R² - Coeficiente de Determinação

RL - Neossolo Regolítico

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SWAT+ - *Soil and Water Assessment Tool*

USDA - *United States Department of Agriculture*

WGN - *Weather Generator*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO GERAL.....	3
2.1 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico.....	4
3.2 Gestão de bacias hidrográficas no Brasil.....	5
3.3 Modelagem Hidrológica.....	6
3.4 Calibração do Modelo e Índices Estatísticos de Desempenho.....	8
3.4.1 Coeficiente de Determinação (R^2).....	9
3.4.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE).....	9
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	12
4.1 Localização.....	12
4.2 Caracterização Climática.....	14
4.3 Relevo e Pedologia.....	14
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
5.1 Sistemas Computacionais.....	20
5.2 Dados do Solo.....	20
5.3 Séries Temporais Fluviométricas e Climatológicas.....	22
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	28
6.1 Caracterização física da bacia do Rio Pará.....	28
6.2 Calibração do modelo hidrológico.....	29
7 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O estudo da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica é fundamental para orientar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos naturais. De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2016), a crescente demanda por água subterrânea para sustentar a expansão agrícola, industrial e urbana na região da bacia do Rio Pará, Minas Gerais, torna necessários estudos sobre a disponibilidade hídrica no reservatório. A observação e simulação da vazão sazonal de uma bacia possibilita o gerenciamento do volume de água disponível na bacia, fornecendo subsídios para o gerenciamento desses recursos. Contudo, esse cálculo é influenciado pelas características particulares da região de estudo, como clima, vegetação, uso e ocupação e tipo de solo (Cambraia Neto, et al. 2021), exigindo estudos específicos em cada bacia hidrográfica. Avaliações dessa natureza permitem que gestores de recursos hídricos possam planejar os melhores usos dos recursos e evitar possíveis conflitos, sendo, para isso, importante entender e quantificar os possíveis impactos provenientes das diferentes variáveis. Uma gestão integrada de recursos hídricos necessita de uma melhor compreensão das interações entre as águas superficiais e subterrâneas e de considerar estes sistemas como partes de um único sistema (COELHO et al., 2015).

No caso da bacia hidrográfica do rio Pará, MG., essa análise é particularmente relevante, visto que ela abastece cidades como Divinópolis, Pará de Minas e Itaúna, região que passa por um processo de expansão urbana, agrícola e industrial (IGAM, 2016), o que exige um gerenciamento criterioso para assegurar uma ocupação territorial inteligente e evitar conflitos pelo uso da água. Nesse contexto, aprofundar o conhecimento sobre os processos naturais e seus impactos na disponibilidade e qualidade hídrica é essencial, consolidando-se como um campo de pesquisa em expansão (IGAM, 2006).

A modelagem hidrológica foi desenvolvida para proporcionar a representação do comportamento da bacia hidrográfica através da simulação de processos hidrológicos a fim de estimar as variáveis não monitoradas. Além disso, contribui efetivamente para fornecer informações necessárias para projetos relacionados à gestão dos recursos hídricos. (Moreira et. al). Assim, permitem estimar possíveis impactos sobre a qualidade e quantidade de recursos hídricos e o comportamento da bacia em relação às diferentes variáveis. O avanço

da integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas proporcionou o desenvolvimento de ferramentas com maior embasamento físico, capazes de representar parâmetros de forma distribuída (VEITH et al., 2010). Esses modelos tornaram-se fundamentais para simular o comportamento do ciclo hidrológico em diferentes cenários, levando em conta as escalas espaciais e temporais.

Entre os modelos hidrológicos mais utilizados, destaca-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+), desenvolvido nos Estados Unidos para simular processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Trata-se de um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, capaz de avaliar os impactos das mudanças no uso e ocupação do solo em bacias de diferentes escalas (ARNOLD et al., 2012). Sua interface integrada a softwares de geoprocessamento facilita a utilização de bancos de dados, a elaboração de cenários climáticos e de uso da terra, além da análise espacial das variáveis simuladas. Entretanto, por basear-se em equações que representam de forma simplificada o movimento da água, transporte de sedimentos e nutrientes, o SWAT+ necessita de calibração e validação a partir de dados observados para garantir a confiabilidade dos resultados.

Diante desse cenário, esta pesquisa aplicou a metodologia de análise e calibração do modelo SWAT+ na bacia hidrográfica do rio Pará, em Minas Gerais, visando estimar e representar a vazão da bacia em escala mensal. Com a avaliação do desempenho estatístico e a identificação das potencialidades e limitações físicas do modelo, sobretudo na representação do escoamento de base no período de seca, este trabalho fornece subsídios técnicos ao planejamento e à gestão sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para o equilíbrio entre a expansão urbana, o desenvolvimento econômico e a preservação dos recursos naturais.

2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral calibrar a aplicação do modelo hidrológico SWAT+na estimativa da vazão da bacia hidrográfica do rio Pará, afluente do rio São Francisco, avaliando sua aplicabilidade como ferramenta de suporte à estimativa da disponibilidade hídrica.

2.1 Objetivos Específicos

- a. Delimitar a bacia hidrográfica do Rio Pará e discretizar suas Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) via QSWAT+ usando dados locais de solo, relevo e uso da terra.
- b. Calibrar o modelo hidrológico comparando a vazão mensal simulada com a vazão observada na estação fluviométrica PCH Gafanhoto Porto Pará (ANA).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico constitui um sistema natural no qual a água circula continuamente entre a atmosfera, a litosfera e os oceanos por meio de processos físico-químicos integrados (TUCCI, 1998). A representação quantitativa desse ciclo em uma bacia hidrográfica ocorre pela aplicação do princípio de conservação de massa, traduzido na equação clássica do balanço hídrico (LELIS, 2011). Sob essa abordagem matemática, a precipitação pluviométrica atua como a variável de entrada primária, sendo equilibrada pelas saídas associadas à evapotranspiração real e ao escoamento total, combinadas com o armazenamento interno de água no solo e nos aquíferos (RODRIGUES, 2013). Assim, a bacia proporciona a integração desses fluxos físicos, cuja quantificação precisa é indispensável para o planejamento ambiental e a gestão de recursos hídricos (TUCCI, 1998).

Nos modelos hidrológicos semi-distribuídos, a simulação do ciclo da água é dividida em duas etapas principais: a fase terrestre e a fase de propagação nos canais. Na fase terrestre, o modelo calcula o destino da chuva assim que ela atinge o solo, definindo a quantidade de água retida pela vegetação, o volume que infiltra na terra e a parcela que escorre pela superfície. Em seguida, na fase de propagação, simula-se o movimento dessa água ao longo da rede de rios até a saída da bacia (NEITSCH et al., 2011). Essa divisão permite analisar, de forma detalhada e localizada, como diferentes tipos de solo, relevo e cobertura vegetal influenciam diretamente a produção de água na região (LELIS, 2011).

Dentro dos componentes do balanço hídrico, o escoamento de base (baseflow) representa a contribuição contínua da água subterrânea proveniente do aquífero raso para os cursos d'água (ARNOLD et al., 2012). Esse escoamento é sustentado pelos processos de infiltração profunda e recarga subterrânea, que dependem diretamente da condutividade hidráulica do solo e da capacidade de armazenamento das formações geológicas. Durante os períodos de estiagem prolongada, o escoamento de base é o único responsável por manter a perenidade dos rios, mantendo o fluxo fluvial constante na ausência de eventos de precipitação. Portanto, a modelagem da dinâmica subterrânea é crítica para estimar de maneira precisa a disponibilidade de água no período de seca (KARDHANA et al., 2024).

Apesar de sua relevância, a simulação do escoamento de base em modelos semi-distribuídos apresenta limitações teóricas consideráveis, especialmente sob condições

de estiagem crítica. O modelo SWAT, por exemplo, simplifica a dinâmica subterrânea utilizando o conceito de reservatório linear, o que pode falhar ao representar as taxas de recessão reais e os caminhos preferenciais de fluxo em aquíferos complexos ou de comportamento não linear (ARNOLD et al., 2012). Essa simplificação frequentemente resulta em subestimativas ou superestimativas das vazões mínimas históricas, demandando um ajuste refinado dos parâmetros de condutividade hidráulica, retardo e armazenamento subterrâneo durante a etapa de calibração (RODRIGUES, 2013). Consequentemente, o entendimento destas limitações matemáticas é essencial para evitar diagnósticos equivocados sobre a resiliência hídrica de uma bacia face a secas severas (KARDHANA et al., 2024).

3.2 Gestão de bacias hidrográficas no Brasil

As bacias hidrográficas são unidades territoriais básicas para o planejamento, gestão e implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, conforme estabelecido pela Lei Federal nº 9.433/1997. Cada bacia delimita de forma natural as interações entre as atividades humanas, o uso do solo e os ecossistemas aquáticos (TUCCI, 1998). Diante do crescimento das demandas urbanas e produtivas, a adoção da bacia como escala de análise viabiliza a avaliação integrada do balanço entre oferta e demanda de água (RODRIGUES, 2013).

No contexto nacional, a Bacia do Rio São Francisco destaca-se por sua vasta extensão territorial e por sua importância socioeconômica e geopolítica para o abastecimento público, irrigação e geração de energia no Brasil. Esta bacia é subdividida em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. As sub-bacias localizadas na porção do Alto São Francisco, situadas majoritariamente no estado de Minas Gerais, desempenham um papel hidrológico crítico, pois são responsáveis pela maior parcela da produção de água e pela manutenção das vazões perenes que abastecem o curso principal rumo ao semiárido nordestino (FARIAS et al., 2023).

Inserida na porção do Alto São Francisco, a bacia hidrográfica do Rio Pará abrange uma região de expressiva relevância econômica no centro-oeste de Minas Gerais, caracterizada por um acelerado crescimento populacional, industrial e agropecuário. Esse

cenário exerce uma pressão crescente sobre os mananciais da bacia, resultando em múltiplos conflitos pelo uso da água entre setores de abastecimento público, irrigação agrícola e diluição de efluentes industriais (RODRIGUES, 2013).

Um estudo realizado por Mafra et. al, 2025, aponta para uma tendência sistemática de redução nas vazões históricas médias e de estiagem do Rio Pará, indicando que pode ter sido agravada pelas alterações drásticas no uso e cobertura da terra e pelos cenários de mudanças no clima. Em virtude desse cenário de escassez e da crescente demanda hídrica, torna-se importante monitorar a recarga dos aquíferos e validar métodos que sirvam de suporte à tomada de decisão regulatória. Assim, a aplicação de modelos matemáticos calibrados consistem em ferramentas indispensáveis para prever disponibilidades futuras e garantir a segurança hídrica na bacia (RODRIGUES, 2013).

3.3 Modelagem Hidrológica

A modelagem matemática na hidrologia passou por profundas transformações conceituais e tecnológicas ao longo das últimas décadas. Os modelos iniciais possuíam natureza puramente empírica e agregada, como a Fórmula Racional, limitando as simulações a estimativas simplificadas de picos de escoamento sem representação espacial das características da bacia. Posteriormente, o desenvolvimento de computadores viabilizou o surgimento de modelos conceituais baseados em balanços de reservatórios e, finalmente, de modelos de base física e espacialmente distribuídos (RODRIGUES, 2013). Essa evolução permitiu aos pesquisadores simular processos simultâneos de escoamento, sedimentologia e qualidade da água com alta resolução temporal e espacial (LELIS, 2011).

Nesse cenário evolutivo, destaca-se o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+), uma ferramenta de simulação contínua, de base física e passo de tempo diário, desenvolvida pela USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) e Texas A&M AgriLife Research. O SWAT+ opera dividindo a bacia em sub-bacias e estas, por sua vez, em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), as quais reúnem combinações homogêneas de uso da terra, tipo de solo e classes de declividade. A conceituação de URH permite uma representação fiel da variabilidade espacial dos processos hidrológicos terrestres, facilitando o cálculo de infiltração, escoamento superficial e subterrâneo para cada porção da paisagem

(LELIS, 2011). Essa estrutura consagrou o modelo como um dos mais aplicados mundialmente na gestão de recursos hídricos.

Estudos de modelagem hidrológica têm demonstrado que o SWAT+ é uma ferramenta altamente adaptável e amplamente aplicada para a simulação contínua de vazões em bacias hidrográficas de diferentes escalas e sob regimes climáticos distintos. No Brasil, o modelo tem sido frequentemente utilizado para avaliar os impactos da expansão agrícola e urbana sobre o regime hidrológico de rios federais e estaduais (LELIS, 2011). O sucesso dessas aplicações reside na capacidade do SWAT+ de espacializar os processos do solo e da vegetação, permitindo aos gestores prever as alterações na vazão total e na disponibilidade hídrica de longo prazo a partir de diferentes cenários de manejo (FARIAS et al., 2023). Como exemplo prático dessa aplicação na mesma bacia, Rodrigues (2013) aplicou o modelo SWAT+ para simular os efeitos do reflorestamento com eucalipto em larga escala, estimando reduções de 18,19% (em áreas de latossolos) e 24,84% (em áreas de argissolos) na disponibilidade hídrica anual da bacia.

Um dos processos fundamentais no SWAT+ é a evapotranspiração (ET), que atua como o principal componente de saída de água no balanço hídrico de bacias tropicais (KARDHANA et al., 2024). Para estimá-la, o método de Penman-Monteith destaca-se como uma formulação física robusta, combinando o balanço de energia na superfície terrestre com o transporte aerodinâmico de vapor d'água (MONTEITH, 1965). Esse método incorpora tanto a resistência aerodinâmica da atmosfera quanto atividades vegetativas para estimar a perda de água por transpiração vegetal e evaporação do solo de forma integrada (ALLEN et al., 1998). A representação matemática desta dinâmica é expressa pela Equação 1, de Penman-Monteith parametrizada pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO):

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

Onde:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm/dia),

Rn = radiação líquida na superfície da cultura (MJ/m²/dia),

G = densidade do fluxo de calor no solo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$),

T = temperatura média do ar a 2 metros de altura ($^{\circ}\text{C}$),

u_2 = velocidade do vento medida a 2 metros de altura (m/s),

$(e_s - e_a)$ = o déficit de pressão de vapor (kPa),

Δ = declividade da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) e

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)

No modelo SWAT, a aplicação de Penman-Monteith exige um conjunto completo de dados climáticos diários, incluindo radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, oferecendo uma representação altamente fiel à demanda evaporativa da bacia (NEITSCH et al., 2011). Por ser fisicamente fundamentado, esse método busca mitigar as incertezas inerentes à simulação do balanço hídrico decorrentes de alterações no uso da terra ou de projeções de mudanças climáticas, superando abordagens simplificadas que se limitam a estimar a evapotranspiração com base unicamente em médias térmicas (KARDHANA et al., 2024).

3.4 Calibração do Modelo e Índices Estatísticos de Desempenho

A calibração constitui uma etapa obrigatória para conferir confiabilidade física e consistência estatística às saídas de um modelo hidrológico (FARIAS et al., 2023). A calibração consiste no ajuste sistemático de parâmetros cujos valores não podem ser determinados diretamente por meio de medições de campo, visando aproximar as curvas de vazão simuladas daquelas efetivamente registradas pelas estações fluviométricas da bacia (RODRIGUES, 2013). Contudo, esse processo de ajuste está sujeito ao fenômeno no qual diferentes conjuntos e combinações de parâmetros produzem simulações idênticas no exutório. Para atenuar essa limitação, realiza-se previamente uma análise de sensibilidade, permitindo isolar e calibrar prioritariamente os parâmetros que exercem maior controle sobre as taxas de infiltração, escoamento e retenção de água na bacia. Após essa parametrização, o modelo deve passar por uma etapa de calibração independente, testando o ajuste calibrado contra dados de vazão observados em um período histórico distinto e sem novas alterações nos parâmetros, o que comprova a capacidade preditiva do modelo (ABBOTT et al., 1986).

O método CALSI (*Calibration by Latin-hypercube Sampling Iterations*) é uma estratégia de calibração automatizada que utiliza a Amostragem por Hipercubo Latino (LHS) para ajustar os parâmetros de modelos hidrológicos complexos como o SWAT+. O seu funcionamento básico consiste em dividir a faixa de valores potenciais de cada parâmetro em intervalos de igual probabilidade, garantindo que o algoritmo teste combinações que cubram todo o espaço de incerteza de maneira uniforme e sem repetições redundantes. Conforme detalhado na abordagem do *Progressive Latin Hypercube Sampling* (SHEIKHOESLAMI; RAZAVI, 2017), essa técnica destaca-se por permitir a inserção progressiva e estratificada de novas amostras de parâmetros a cada rodada de simulação. Assim, a cada iteração, o CALSI avalia as métricas de desempenho do modelo, descarta os intervalos de valores que geraram resultados ruins e refina o foco estritamente nas faixas paramétricas que melhor reproduzem o comportamento real da bacia, garantindo uma convergência rápida e robusta.

3.4.1 Coeficiente de Determinação (R^2)

Para quantificar e classificar a precisão do ajuste do modelo hidrológico, a literatura científica recorre a índices estatísticos de desempenho, dentre os quais o Coeficiente de Determinação (R^2) é tradicionalmente o mais difundido (PALMA, 2022). O R^2 mede a proporção da variabilidade dos dados observados que é explicada matematicamente pelo modelo por meio de uma linha de regressão linear simples (UFMG, 2011). Todavia, a utilização isolada desta métrica em modelos de simulação ambiental é alvo de severas críticas metodológicas, dado que o R^2 avalia estritamente o grau de colinearidade e a sincronia temporal de picos e vales, sendo insensível a desvios sistemáticos de magnitude (PALMA, 2022). Sob essa ótica, um modelo que sistematicamente simule o dobro da vazão real medida em campo ainda poderá apresentar um R^2 muito próximo de 1,0, induzindo o modelador a uma avaliação superestimada e ocultando falhas graves no balanço de massa da bacia simulada (UFMG, 2011).

3.4.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE)

Com o propósito de solucionar as vulnerabilidades do R^2 , o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) consolidou-se como o índice padrão de desempenho na engenharia de recursos hídricos e na modelagem hidrológica (NASH; SUTCLIFFE, 1970). O COE avalia

a magnitude da variância dos resíduos (diferença entre os valores medidos e simulados) em relação à variância dos dados reais coletados em campo, sendo calculado pela Equação 2:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (2)$$

Onde:

Q_0^t : valor observado no tempo t.

Q_m^t : valor simulado (previsto) pelo modelo no tempo t.

$\overline{Q_0}$: média dos valores observados.

O índice oscila em um intervalo de $-\infty$ a 1,0. Um coeficiente igual a 1,0 indica um ajuste perfeito entre os valores simulados e observados; um valor igual a 0 indica que o modelo apresenta desempenho equivalente ao de simplesmente adotar a média histórica dos dados observados; e valores menores ou iguais a zero sugerem que a média histórica seria um previsor estatístico mais preciso do que os resultados gerados pela própria modelagem (FARIAS et al., 2023). Para a interpretação do desempenho de modelos de vazão na escala mensal, adotam-se comumente as faixas de classificação propostas por Moriasi et al. (2007), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 — Classificação do desempenho de modelos hidrológicos segundo o COE (escala mensal)

Faixa de COE	Classificação do desempenho
$0,75 < COE \leq 1,00$	Muito bom
$0,65 < COE \leq 0,75$	Bom
$0,50 < COE \leq 0,65$	Satisfatório
$COE \leq 0,50$	Insatisfatório

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

No entanto, em decorrência de sua estrutura matemática, que eleva as diferenças entre dados observados e simulados ao quadrado, o COE tradicional é altamente sensível a

valores extremos de vazão (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Consequentemente, o índice confere um peso desproporcional aos picos de cheia ocorridos nos períodos chuvosos, permitindo que o modelo seja classificado como "excelente" ou "muito bom" mesmo que apresente erros grosseiros e subestimativas severas durante a simulação das vazões de estiagem. Essa característica reforça a importância de se utilizar de forma integrada outros índices estatísticos complementares, e de realizar análises visuais do hidrograma focadas no comportamento do escoamento subterrâneo e das curvas de recessão de seca (KARDHANA et al., 2024).

3.5 Aplicação do SWAT+ em Bacias Tropicais Brasileiras

O modelo SWAT+ tem sido amplamente aplicado em bacias hidrográficas brasileiras de clima tropical, com o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) sendo adotado como principal métrica de avaliação de desempenho. Os valores relatados na literatura, contudo, variam significativamente em função da escala da bacia, da qualidade dos dados de entrada — em especial os de solo — e da estratégia de calibração adotada, o que fornece um importante referencial para a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho.

Em escala local, Lelis (2011) aplicou o SWAT+ à bacia do Ribeirão São Bartolomeu, na Zona da Mata de Minas Gerais, obtendo coeficientes de eficiência (COE) de 0,999 para o escoamento superficial e 0,953 para a produção de sedimentos na etapa de calibração — desempenho classificado como muito bom. Tais valores elevados estão associados ao fato de a autora ter empregado uma base de dados de solo altamente detalhada e específica, obtida a partir de levantamentos e análises laboratoriais dos perfis de solo da bacia, o que reduziu substancialmente as incertezas de parametrização em uma área de pequena extensão e maior homogeneidade.

Em uma escala e um contexto mais próximos ao deste estudo, Rodrigues (2013) modelou a produção de água na própria bacia do Rio Pará (Alto São Francisco/MG), avaliando os efeitos de alterações de uso do solo e da implantação de florestas de eucalipto. O autor obteve um coeficiente de Nash-Sutcliffe mensal de 0,793, classificado como muito bom, demonstrando a aplicabilidade do SWAT+ para a simulação da vazão nessa bacia — o que constitui o referencial mais direto para o presente trabalho, por tratar-se da mesma área de estudo.

Já em escala regional, Farias et al. (2023) realizaram a calibração da bacia hidrográfica do Rio São Francisco em sua totalidade (639.219 km²), utilizando o SWAT-CUP e dados mensais de vazão do período de 1961 a 2016. Os autores obtiveram coeficientes de Nash-Sutcliffe entre 0,55 e 0,69, classificados como satisfatórios a bons. O desempenho mais moderado, quando comparado aos estudos de escala local, é atribuído às limitações inerentes à modelagem de uma bacia de grandes dimensões e elevada heterogeneidade — como o alto custo e tempo de processamento computacional e as maiores incertezas associadas à calibração de um sistema tão extenso.

Observa-se, portanto, uma tendência de redução dos valores de COE à medida que aumentam a escala e a complexidade da bacia, bem como uma forte dependência da qualidade e do detalhamento dos dados de solo. Esse conjunto de resultados fornece o intervalo de referência sobre o qual o desempenho obtido neste trabalho será discutido.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Pará (Figura 1) constitui uma das 10 unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais. Está localizada na região do Alto Rio São Francisco, em Minas Gerais, abrangendo uma área aproximada de 12.233 km², o que corresponde a 5,22% da bacia do rio São Francisco, e percorre 34 municípios (CBHSF2, 2026). A população total, segundo o Censo de 2010, é de 732.755 habitantes, sendo 657.133 em áreas urbanas e 75.622 em áreas rurais, resultando em densidade demográfica de aproximadamente 62,7 hab/km² (IGAM, 2026; IBGE, 2011).

[illegible]

No entanto, para que esta modelagem computacional apresentasse resultados consistentes, a área delimitada pelo modelo QSWAT+ totalizou aproximadamente 11.253,07 km². Essa variação em relação à área total da bacia justifica-se pelo posicionamento estratégico do exutório do modelo na estação fluviométrica PCH Gafanhoto Porto Pará (Código ANA 40450001), estação mais próxima ao exutório real da bacia. Esta configuração restringe a área de simulação à porção da bacia que contribui com vazão monitorada, possibilitando a comparação entre o resultado da modelagem e a vazão observada, essencial para os métodos estatísticos de calibração.

A bacia hidrográfica do Rio Pará está localizada na porção centro-sul de Minas Gerais. Suas cabeceiras estão situadas na Serra das Vertentes, próximas ao povoado de Hildebrando, município de Resende Costa – MG; adjacente ao divisor norte da cabeceira do Rio Brumado. O talvegue apresenta extensão total de cerca de 210 km, desenvolvendo-se desde a altitude de 600 metros até 1340 metros (CBH Rio Pará, 2025), e está situada na posição geográfica do retângulo envolvido pelas coordenadas UTM, Fuso 23, Hemisfério Sul, Sistema Geodésico SAD 69 (South American Datum 1969), E=458.351,58m e N=7.876.171,74m e E=580.954,69m e N=7.699.462,22m.

4.2 Caracterização Climática

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima predominante na bacia do Rio Pará é o tropical úmido do tipo Cwa, caracterizado por invernos secos e amenos e verões quentes e chuvosos (CBH Rio Pará, 2025). O regime pluviométrico apresenta forte sazonalidade, com precipitações médias anuais oscilando entre 1.200 mm e 1.700 mm. As chuvas concentram-se majoritariamente no período de outubro a março, sendo o mês de dezembro historicamente o mais chuvoso, enquanto o mês de agosto representa o ápice do período de estiagem (CBHSF, 2025).

Em relação ao comportamento térmico, os dados do Plano Diretor da bacia indicam que as temperaturas médias mínimas variam entre 14,5 °C e 17,0 °C nos meses de inverno, enquanto as médias máximas atingem marcas entre 27,5 °C e 30,0 °C durante o verão (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS, 2016). Essa amplitude térmica e o padrão de radiação solar regional exercem controle direto sobre as taxas de evapotranspiração da bacia.

4.3 Relevo e Pedologia

O relevo da bacia do Rio Pará é predominantemente ondulado, como mostrado na Figura 2, com altitudes oscilando de 600 metros nas proximidades da foz até 1.340 metros nas cristas montanhosas de suas cabeceiras (CBHSF, 2025). Para a espacialização e cálculo das classes de declividade na área delimitada para este estudo, utilizou-se o processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) do IDE SISEMA, 2026, classificado de acordo com os intervalos recomendados pela Embrapa (2018), conforme apresentado na Tabela 2.

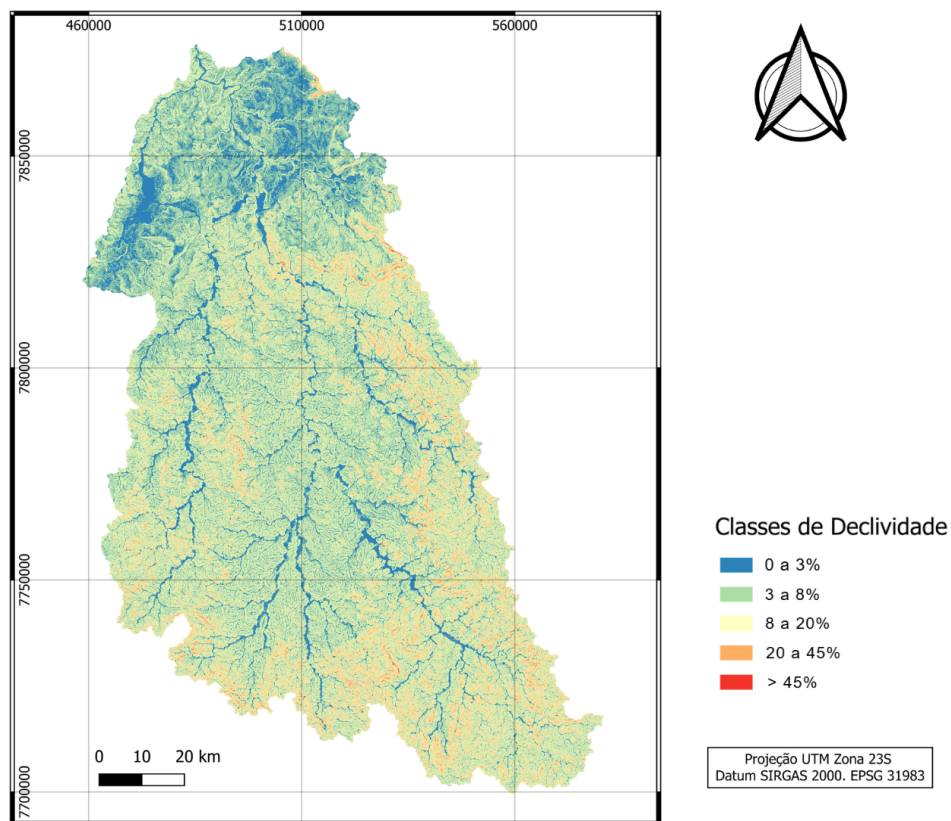
Tabela 2: Classes de declividade (relevo) na área de estudo da bacia do Rio Pará.

Classe de Declividade (%)	Classificação do Relevo	Área (ha)	% da Bacia
0 - 3	Plano	109.668,27	9,75
3 - 8	Suave Ondulado	310.869,59	27,63
8 - 20	Moderadamente Ondulado	490.022,29	43,55
20 - 45	Ondulado / Forte Ondulado	202.507,43	18,00
> 45	Escarpado / Montanhoso	12.239,52	1,09
Total	-	1.125.307,11	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base na classificação da Embrapa (2018).

A predominância do relevo Moderadamente Ondulado a Ondulado (que somam 61,55% da área nas faixas de 8% a 45%) é uma característica marcante da porção centro-oeste de Minas Gerais. Do ponto de vista hidrológico, encostas com maior declividade reduzem o tempo de concentração da água na superfície, acelerando o escoamento superficial direto em direção aos canais de drenagem (TUCCI, 1998).

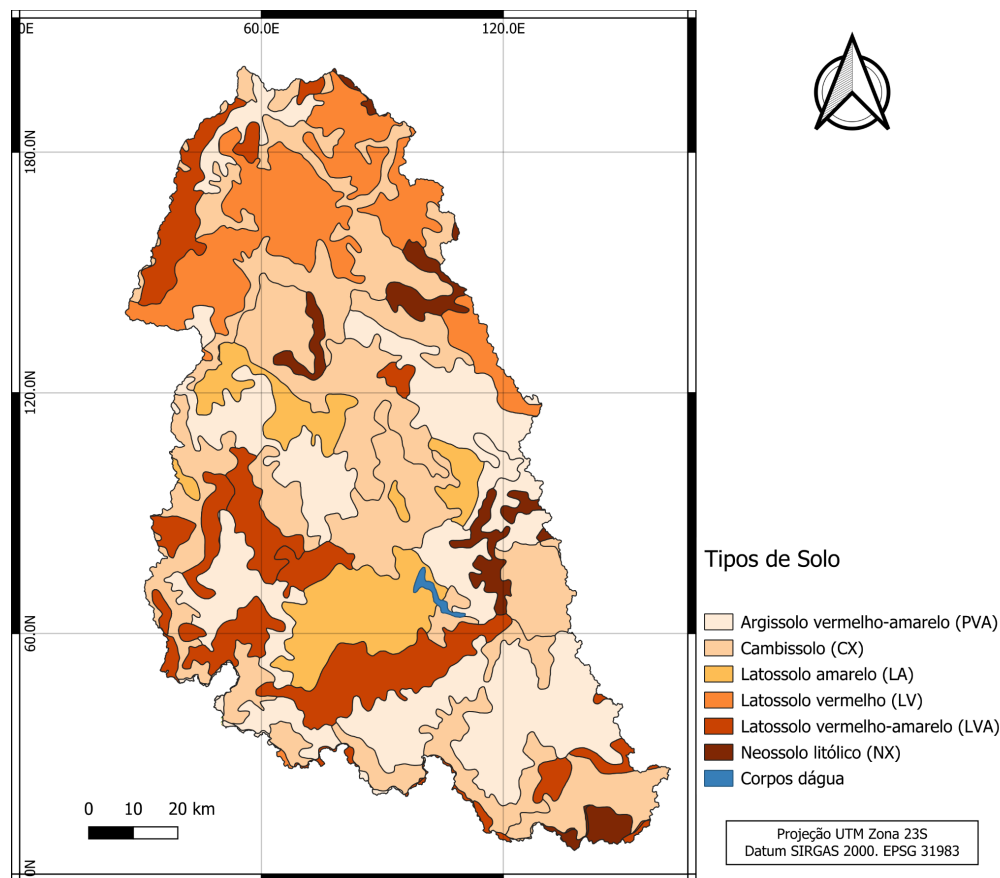
Figura 2: Mapa de Declividade da Bacia do Rio Pará, MG



Elaborado pela autora a partir de dados do IDE SISEMA, 2026.

Essa dinâmica interage diretamente com as propriedades pedológicas da bacia. O mapeamento de solos utilizado nesta pesquisa foi obtido junto à Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE SISEMA), cuja base espacial baseia-se no Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade de Solos do Estado de Minas Gerais, desenvolvido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (FEAM; UFV; CETEC; UFLA, 2010). A distribuição das classes pedológicas na bacia está detalhada na Tabela 2.

Figura 3: Tipos de Solo predominantes na Bacia do Rio Pará, MG

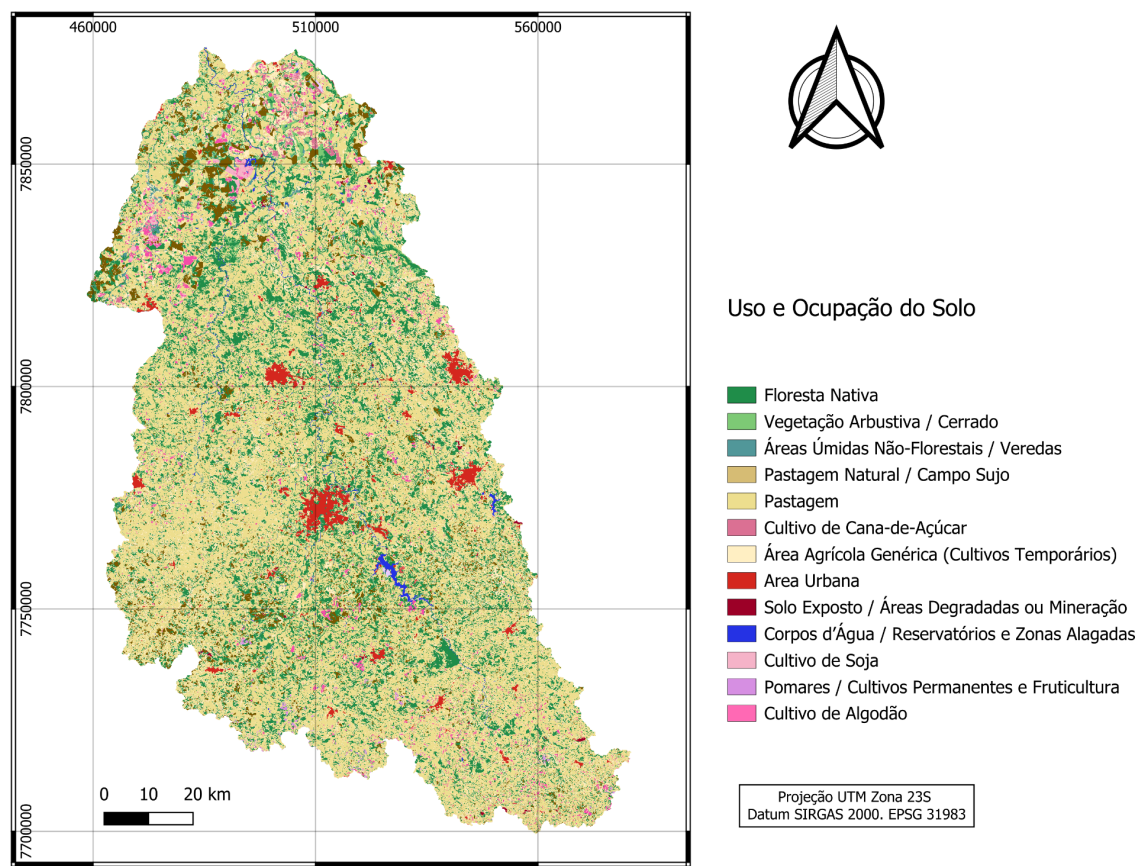


Elaborado pela autora a partir de dados de IDE SISEMA, FEAM, UFV, 2010.

4.4 Uso do Solo

A cobertura vegetal natural é composta por cerrado, veredas e floresta estacional semidecidual, inseridas no domínio do bioma Mata Atlântica. Entretanto, o uso antrópico modificou intensamente a paisagem, com destaque para a expansão agropecuária e da silvicultura, sobretudo com o cultivo de eucalipto. Estima-se que 68% da área apresente aptidão agrícola, 12% seja voltada para pecuária e 19% para silvicultura (CBH Rio Pará, 2025).

Figura 4: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Pará, MG



Elaborado pela autora a partir de dados do MapBiomas, Coleção 9.0, 2024

Para a caracterização detalhada do uso e ocupação da terra, utilizou-se a base de dados vetoriais do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, que possuem uma resolução espacial de 30 metros (MapBiomas, Coleção 9.0, 2024), o qual está representado na Figura 4. Os cálculos de área para cada classe de cobertura dentro do limite de estudo foram processados em SIG e estão sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3: Porcentagem de cobertura e uso do solo da bacia do Rio Pará, MG

Descrição da Cobertura / Uso do Solo	Área (ha)	% da Bacia
Pastagem	610.360,51	54,24
Floresta Nativa / Cobertura Florestal Mista	267.674,09	23,79
Área Agrícola Genérica (Cultivos Temporários)	169.441,28	15,06
Área Urbana Adensada	22.199,97	1,97
Vegetação Arbustiva / Cerrado	17.343,11	1,54
Áreas Úmidas Não-Florestais / Veredas	11.217,28	1,00
Pastagem Natural / Campo Sujo	7.734,67	0,69
Corpos d'Água / Reservatórios e Zonas Alagadas	6.312,77	0,56
Cultivo de Cana-de-Açúcar	4.225,02	0,38
Solo Exposto / Áreas Degradadas ou Mineração	3.621,28	0,32
Pomares / Cultivos Permanentes e Fruticultura	2.847,38	0,25
Cultivo de Soja	2.329,56	0,21
Cultivo de Algodão	0,18	0,00
TOTAL	1.125.307,11	100,00

Dados de saída do modelo gerados pela autora (2026) com base no MapBiomias.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização e a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pará por meio do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT+), estruturou-se um banco de dados espacial detalhado. Com base em revisão bibliográfica, foram identificados e selecionados os parâmetros de solo para entrada, além de parâmetros sensíveis aos processos de infiltração da água no solo e o balanço hídrico, para calibração. Os dados foram obtidos junto à Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do portal Hidroweb.

5.1 Sistemas Computacionais

O processamento de dados geoespaciais, reprojeção cartográfica e a confecção dos mapas foram realizados no Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS (versão 3.44.11). A modelagem matemática do balanço hídrico foi executada utilizando o modelo SWAT+ (revisão 61.0.2), gerenciado por meio da interface gráfica SWAT+ Editor (versão 3.2.4).

Para a tradução, conversão e estruturação das tabelas de atributos dos solos e das classes de uso da terra para o formato lido pelo modelo, utilizou-se a extensão Letos. Por fim, as etapas de calibração automatizada foram conduzidas com o auxílio do software SWAT+ Toolbox (versão 3.2).

5.2 Dados do Solo

A caracterização física do terreno utilizou um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros, e o mapa de classes de solo, disponibilizados pelo IDE-Sisema, responsável por subsidiar a análise do relevo.

Para a modelagem hidrológica, o mapa vetorial de solos foi simplificado para suas classes principais: Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo Háplico (CX), Neossolo Regolítico (RL) e Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA).

Como o SWAT+ exige parâmetros físico-hídricos específicos para cada horizonte do solo para simular os processos de infiltração e armazenamento, realizou-se uma síntese de dados baseada em estudos publicados na mesma região geográfica. Foram levantados os seguintes atributos de entrada para o sistema: número e profundidade das camadas, grupo

hidrológico (HYDGRP), máxima profundidade (m) de enraizamento (SOL_ZMX), porosidade/ exclusão de ânions (ANION_EXCL), densidade (SOL_BD), teores percentuais de areia, argila, silte e fragmentos de rocha, teor percentual de carbono orgânico (SOL_CBN), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), capacidade de água disponível (SOL_AWC) e o fator de erodibilidade do solo (K_USLE).

A origem dos parâmetros variou conforme a classe de solo, sendo compilada e sintetizada na Tabela 4:

Tabela 4: Parâmetros do solo de entrada no SWAT+

SNAM	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	NLAYERS	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	USLE_K
PVA	B	480	0.37	1	220	1.5	118	64	4.4	47	35	18	0	0.199
				2	480	1.5	118	9.4	1.5	54	31	16	0	0.199
CX	C	1500	0.41	1	70	1.32	0.13	4.3	2.52	26.6	22.3	51.1	1.3	0.07
				2	220	1.36	0.13	4.3	1.13	28.5	19.6	51.9	1.8	0.07
				3	430	1.36	0.13	4.3	0.65	28.4	19.8	51.8	1.1	0.08
				4	700	1.38	0.13	4.3	0.54	30.4	21.5	48.1	1.4	0.08
				5	1260	1.48	0.13	4.3	0.32	26.3	27.1	46.6	3.1	0.1
				6	1500	1.48	0.13	13.2	0.13	18.2	37.1	44.7	0.9	0.13
LA	A	2000	0	1	300	0.86	0.15	2602.6	1.65	58.8	21.75	19.4	0	0.017
				2	1000	0.94	0.12	505.5	0.87	62.28	19.9	17.8	0	0.015
				3	3500	0.94	0.12	186.92	0.87	62.3	19.9	17.83	0	0.015
LV	A	2000	0.46	1	300	0.9	0.12	612.2	1.67	53.93	28.37	13	0	0.018
				2	1000	0.94	0.14	461.07	01.01	66.28	22.93	10.79	0	0.015
				3	2000	1	0.14	142.32	01.01	66.3	23	10.8	0	0
LVA	D	2550	0.48	1	140	1.33	0.12	0.6	2.62	47.2	15.4	37.4	1.3	0.04
				2	280	1.3	0.12	0.6	1.74	49.1	13.9	37	3.7	0.03
				3	410	1.3	0.12	0.6	1.25	55.1	12.9	32	2.3	0.03
				4	680	1.29	0.12	0.6	0.82	57	11	32	1.3	0.03
				5	1050	1.29	0.12	0.6	0.64	56.9	7.7	35.4	2.4	0.02
				6	1400	1.28	0.12	0.6	0.42	52.8	11.1	36.1	4.9	0.03
				7	1550	1.28	0.12	0.6	0.39	52.8	10.8	36.4	15.7	0.03
RL	A	490	0.45	1	153	1.38	0.11	25.9	2.12	12.67	22.17	65.16	1	0.09
				2	240	1.38	0.11	25.9	1.48	9.8	24	66.2	1	0.11
				3	490	1.38	0.11	25.9	0.41	8.5	26.5	65	1	0.15

Compilado pela autora com base em dados de Silva, 2024; Pereira, 2023; Furquim et. al, 2013; IDE SISEMA, 2026.

Onde os valores para a classe de solo PVA foram retirados de Silva, 2024; os valores de Cx, LVA e RL foram retirados de Pereira, 2023; e os valores de LA e LV foram retirados de Furquim et. al, 2013. Apenas os dados de awc, para os solos PVA, CX, LVA e RL foram retirados do IDE SISEMA.

O mapeamento do uso e cobertura da terra foi obtido a partir da Coleção 9, 2024, do

projeto MapBiomas. Este plano de informação forneceu o detalhamento espacializado da vegetação nativa remanescente e a distribuição das atividades antrópicas ao longo da bacia.

5.3 Séries Temporais Fluviométricas e Climatológicas

A alimentação meteorológica do modelo utilizou registros diários contínuos obtidos junto ao banco de dados do INMET, abrangendo quatro estações convencionais localizadas no perímetro da bacia (Tabela 5).

Tabela 5: Estações hidrometeorológicas utilizadas

Estação	Código	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude (m)	Período de dados
Florestal	83581	7801094S	561040S	753,5	1990–2018 (conv.)
Divinópolis	83635	7769336S	513092S	787,0	1995–2021 (conv.)
Oliveira	83637	7711065S	518754S	991,0	1990–2017 (conv.)
Pompéu	83570	7873845S	499863S	692,0	1990–2015 (conv.)

Fonte: INMET, 2026

Para a estimativa da evapotranspiração potencial por meio do método de Penman-Monteith, o modelo hidrológico requer a inserção de variáveis meteorológicas diárias. Desse modo, foram inseridas diretamente no modelo as séries diárias observadas de precipitação total (mm), temperatura máxima e mínima (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m/s). Como as estações convencionais registram a insolação (horas de sol) e o SWAT+ exige dados de radiação solar global (MJ/m²/dia), essa variável foi estimada internamente pelo gerador de clima *Weather Generator* (WGN), alimentado pelas estatísticas locais de insolação. Para o controle e a calibração espacial da vazão gerada pelo modelo, foram extraídas séries diárias de dados fluviométricos oficiais obtidos no portal Hidroweb/ANA (Tabela 6).

Tabela 6: Estações fluviométricas selecionadas para a verificação do modelo.

Estação	Código	Latitude (m)	Longitude (m)	Anos Observados
Velho da Taipa	40330000	7820607.15S	509284.8S	1998–2015 (conv.)
PCH Gafanhoto Porto Pará	40450001	7867080.5S	488442.7S	1998–2015 (conv.)

Fonte: portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA), em 2026.

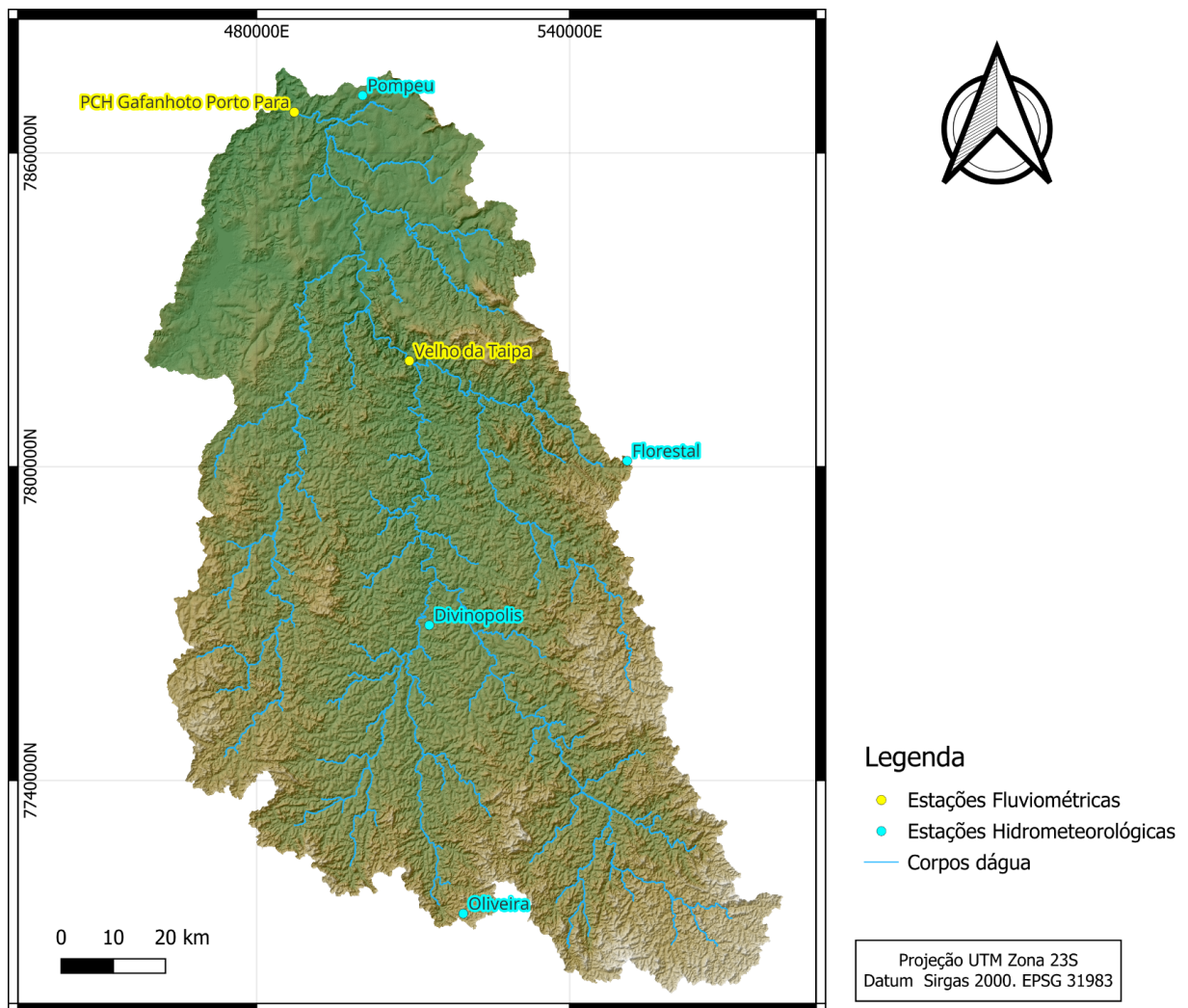
5.4 Delimitação e Criação das URHs

A primeira etapa operacional no ambiente QSWAT+ consistiu na delimitação topográfica automática da bacia utilizando o MDE com resolução espacial de 30m x 30m. Para guiar o traçado real da rede de drenagem e aumentar a precisão do modelo em zonas planas, aplicou-se a técnica de embutimento de canais (*burn-in*), utilizando a base vetorial de hidrografia oficial disponibilizada pelo IDE-Sisema.

Para estruturar a rede de drenagem sem sobrecarregar computacionalmente o sistema e garantir URHs consistentes, adotou-se uma área limiar (*threshold*) de 40 km² para o início dos trechos de drenagem secundários e de 400 km² para a formação dos canais principais. Esses valores foram delimitados pela autora após uma série de testes, visando uma modelagem consistente com a realidade e com a melhor resolução espacial possível.

O ponto de exutório da simulação foi inserido manualmente nas coordenadas de latitude 7867080.5S e longitude 488442.7S, coincidindo com a localização geográfica da estação fluviométrica PCH Gafanhoto Porto Pará (Código 40450001), como mostrado na Figura 5, viabilizando as comparações futuras com os dados consistidos da rede de monitoramento.

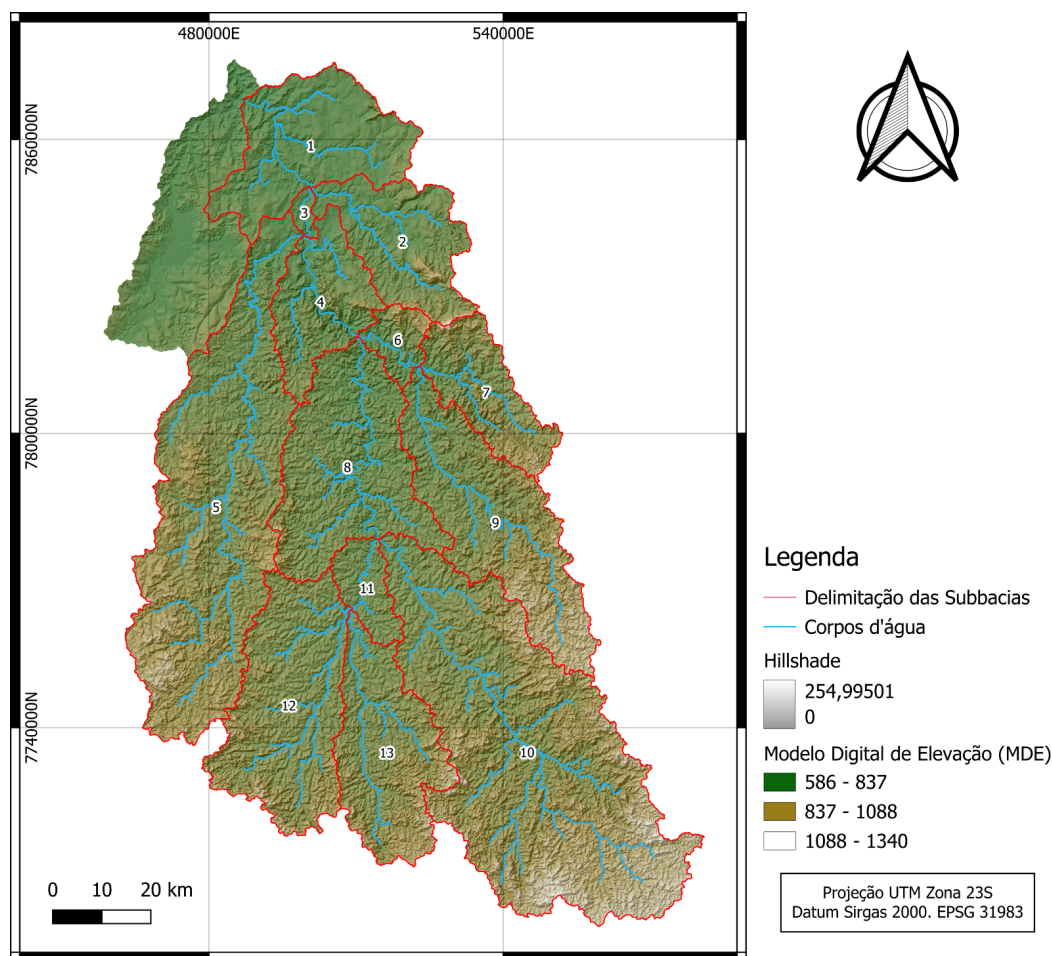
Figura 5: Mapeamento das Estações Fluviométricas e Hidrometeorológicas



Elaborado pela autora com dados disponibilizados pela HidroWeb/ANA, 2026.

Em seguida, o mapa de solos foi integrado ao modelo com o suporte da extensão *Letos*, que automatizou a associação das classes pedológicas aos seus respectivos parâmetros físico-hídricos históricos. O relevo da bacia foi discretizado a partir de seis classes de declividade, definidas pelos limites de 0 a 3% (plano), 3 a 8% (suave ondulado), 8 a 20% (ondulado), 20 a 45% (forte ondulado), 45 a 99.999% (escarpado), seguindo as recomendações do manual do modelo e da literatura. A partir do cruzamento espacial entre esses dados, o modelo discretizou a área de estudo gerando um total de 13 sub-bacias e 2.296 URHs. A discretização das sub-bacias está representada na Figura 6.

Figura 6: Discretização das sub-bacias do Rio Pará gerada pelo SWAT+



Elaborado pela autora a partir de dados de MDE e hidrografia disponibilizados pelo IDE-Sisema

5.5 Alimentação de Dados Meteorológicos e Configuração Temporal da Simulação

Para viabilizar a estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith e o cálculo diário do balanço hídrico na bacia, estruturou-se a base de dados meteorológicos de entrada do modelo. Foram selecionadas quatro estações convencionais do INMET localizadas na bacia e em seu entorno: Florestal (Código 83581), Divinópolis (Código 83635), Oliveira (Código 83637) e Pompéu (Código 83570). O período adotado para a modelagem compreendeu os anos de 1995 a 2015, uma delimitação definida estrategicamente pela consistência e integridade dos registros históricos dessas estações convencionais. A opção por encerrar a série em 2015 justifica-se pelo fato de que os dados

subsequentes, provenientes de estações automáticas na região, apresentavam lacunas críticas e ausência de registros de insolação, o que comprometeria a homogeneidade da simulação de longo prazo.

A execução do modelo foi configurada em passo de tempo mensal para o período total de 21 anos. Os três primeiros anos da série temporária (1995 a 1997) foram programados como período de aquecimento do modelo (*warm-up*). Essa etapa é fundamental para que o código matemático do SWAT+ execute ciclos hidrológicos preliminares, permitindo que os teores iniciais de umidade do solo e as condições de armazenamento dos aquíferos raso e profundo se estabilizem com base no clima local. Consequentemente, as saídas do modelo geradas entre 1998 e 2015 tornaram-se fisicamente consistentes para a representação real da bacia, alinhados com o intervalo de dados fluviométricos observados.

5.6 Calibração do modelo hidrológico

A calibração do modelo foi realizada na estação fluviométrica Velho da Taipa, que corresponde a uma área de drenagem de aproximadamente 7.386 km² representada pelo canal cha008 no modelo. Os parâmetros a serem calibrados foram selecionados com base na literatura, a partir de estudos hidrológicos conduzidos em bacias de regiões próximas, sendo escolhidos aqueles reconhecidos como de alta sensibilidade sobre a resposta hidrológica da bacia (Arnold et al., 2012). Em razão das limitações computacionais do notebook utilizado e visando à eficiência das rodadas de calibração, optou-se por calibrar apenas seis parâmetros: *cn2*, *petco*, *epco*, *esco*, *perco* e *alpha*.

Cada parâmetro atua sobre uma componente distinta do balanço hídrico. O *cn2* (Curve Number) controla a partição da precipitação entre o escoamento superficial e a infiltração, visto que valores maiores aumentam o escoamento direto. O *petco* ajusta a estimativa da evapotranspiração potencial, regulando a quantidade de água perdida para a atmosfera. O *epco* (fator de compensação de absorção pela planta) governa a capacidade das raízes de extrair água das camadas mais profundas do solo para atender à demanda de transpiração. O *esco* (fator de compensação de evaporação do solo) regula a profundidade a partir da qual a evaporação é suprida (valores maiores restringem a evaporação às camadas superiores, reduzindo a evapotranspiração total). O *perco* (coeficiente de percolação) controla a fração de água que percola no perfil do solo para o aquífero, governando a recarga subterrânea. Por fim, o *alpha* (constante de recessão do escoamento de base) caracteriza a velocidade com

que o aquífero libera água para o rio, visto que valores menores resultam em recessão mais lenta e, portanto, em maior sustentação da vazão no período de estiagem.

A calibração foi conduzida de forma automática no software SWAT+ Toolbox, por meio do algoritmo CALSI, tendo o coeficiente de eficiência de COE como função-objetivo. Para cada parâmetro foi definida uma faixa de valores fisicamente aceitável, estabelecida com base na documentação do modelo e na literatura de calibração do SWAT+ (Neitsch et al., 2011; Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012), dentro da qual o algoritmo buscou, por amostragem, a combinação que maximiza o desempenho do modelo. Os intervalos adotados e os valores finais obtidos para cada parâmetro são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros calibrados, faixas adotadas e valores finais

Parâmetro	Faixa adotada	Tipo de ajuste	Valor calibrado
cn2	-5% a +15%	Relativo (%)	-0,975%
petco	0,80 a 1,00	Substituição	0,996
epco	0,10 a 1,00	Substituição	0,350
esco	0,50 a 1,00	Substituição	0,570
perco	0,30 a 0,90	Substituição	0,786
alpha	0,01 a 0,30	Substituição	0,021

Compilado pela autora, 2026.

Durante o processo de calibração automática na estação Velho da Taipa, o mesmo conjunto de parâmetros era simultaneamente aplicado ao ponto de interesse do estudo, a estação PCH Gafanhoto, localizada no exutório da bacia . Uma vez que os parâmetros calibrados são globais e afetam toda a área modelada. Ao final, o coeficiente COE foi calculado para ambas as estações, permitindo avaliar tanto o ajuste no ponto de calibração quanto o desempenho do modelo em um ponto independente, não utilizado no processo de calibração.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

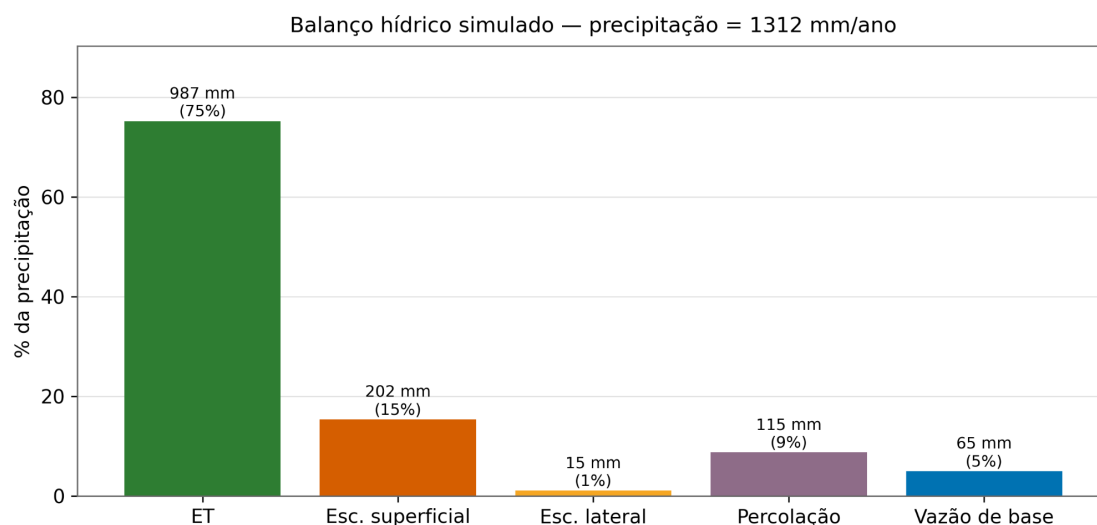
6.1 Caracterização física da bacia do Rio Pará

A delimitação automática realizada pelo SWAT+ a partir do modelo digital de elevação resultou em uma bacia com área de drenagem de aproximadamente 11.253 km², discretizada em sub-bacias e, no interior destas, em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) — obtidas pela combinação dos mapas de tipo de solo, uso e ocupação do solo e classes de declividade. Essa discretização permite que o modelo represente os processos do ciclo hidrológico de forma espacializada em cada porção homogênea da bacia (NEITSCH et al., 2011).

Quanto à pedologia, as seis classes de solo na bacia foram associados aos seus respectivos grupos hidrológicos. Essa distribuição exerce influência direta sobre a partição da água na bacia: os Latossolos (grupo hidrológico A), profundos e permeáveis, favorecem a infiltração e a recarga do aquífero, enquanto o Neossolo Litólico, raso, e as classes de menor permeabilidade (Cambissolo — grupo C; LVA — grupo D) tendem a gerar maior escoamento superficial. A predominância dos parâmetros de solo obtidos das referências (SILVA, 2024; PEREIRA, 2023; Furquim et al., 2013) e complementados pela base do IDE-SISEMA garantiu a representatividade física dos horizontes utilizados na modelagem.

O comportamento hidrológico simulado é sintetizado pelo balanço hídrico médio anual da bacia (Figura 7). De uma precipitação média de 1.312 mm/ano, a evapotranspiração (ET) respondeu pela maior parcela (987 mm, equivalentes a 71% da precipitação), o que é coerente com o clima tropical de altitude e a cobertura vegetal da região. O restante distribuiu-se entre o escoamento superficial (202 mm; 15%), a percolação/recarga do aquífero (115 mm; 9%) e o escoamento lateral (15 mm; 1%), resultando em uma produção de água de 216 mm/ano. A vazão de base proveniente do aquífero correspondeu a 65 mm (5% da precipitação) — componente de especial relevância por sustentar a vazão do rio durante o período de estiagem, conforme discutido na seção seguinte.

Figura 7 — Balanço hídrico médio anual simulado para a bacia do Rio Pará (1998–2015).



Elaborado pela autora, 2026.

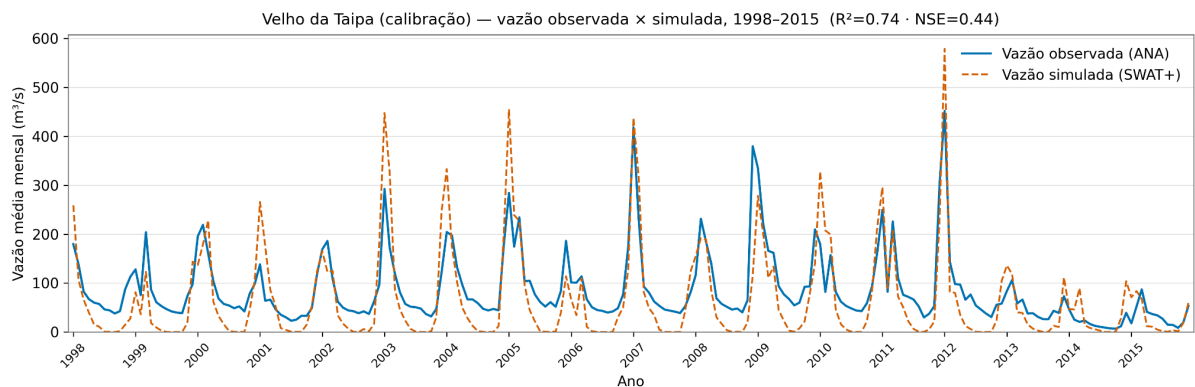
6.2 Calibração do modelo hidrológico

A calibração automática do modelo, conduzida no SWAT+ Toolbox pelo algoritmo CALSI, foi feita sobre 6 parâmetros sensíveis discutidos na literatura, apresentados na Tabela X. A análise desses valores permite algumas inferências sobre o funcionamento hidrológico da bacia. O parâmetro *cn2* manteve-se praticamente inalterado ($-0,97\%$) e o coeficiente de correção da evapotranspiração *petco* aproximou-se da unidade ($0,996$), indicando que a configuração inicial já representava adequadamente tanto a geração de escoamento quanto a demanda evapotranspirativa — o que é coerente com o uso do método de Penman-Monteith, de base física. Os principais ajustes concentraram-se nos parâmetros *epco* ($0,350$), *esco* ($0,570$) e *perco* ($0,786$), responsáveis por distribuir a água entre a transpiração das plantas, a evaporação do solo e a recarga do aquífero.

Na estação de calibração (Velho da Taipa), o modelo apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,74$ e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe $COE = 0,44$ na escala mensal (Figuras 8 e 9). Já na calibração independente, realizada no exutório da bacia (PCH Gafanhoto) — ponto que não participou do processo de calibração —, o desempenho foi superior, com $R^2 = 0,84$ e $COE = 0,58$ (Figuras 10 e 11). Segundo os critérios de MORIASI et al. (2007), o COE obtido no exutório classifica o desempenho do modelo como satisfatório,

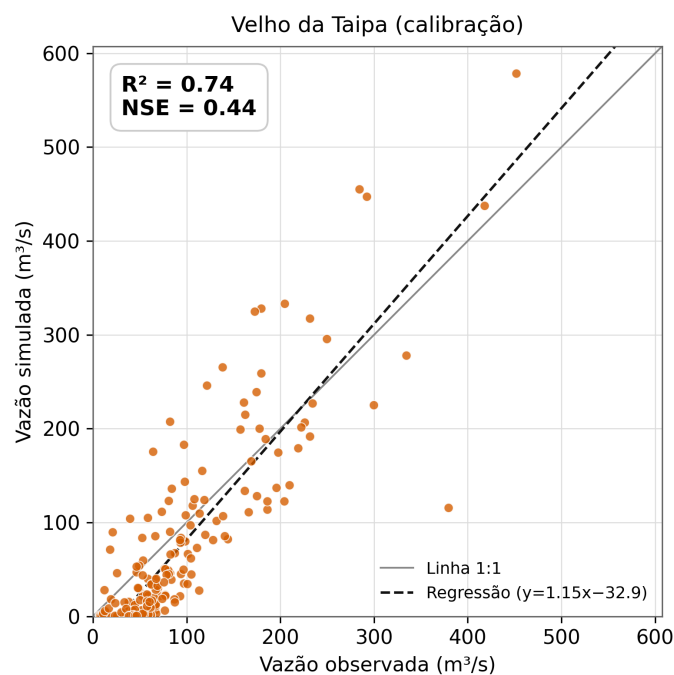
enquanto o elevado valor de R^2 indica uma excelente reprodução da dinâmica temporal das vazões. O fato de o exutório ter apresentado desempenho superior ao ponto interno de calibração reforça a robustez do modelo, comportamento coerente com o efeito de integração da bacia, que suaviza a resposta hidrológica na sua seção de saída.

Figura 8 — Vazão mensal observada (ANA) e simulada (SWAT+) na estação Velho da Taipa, ponto de calibração (1998–2015).



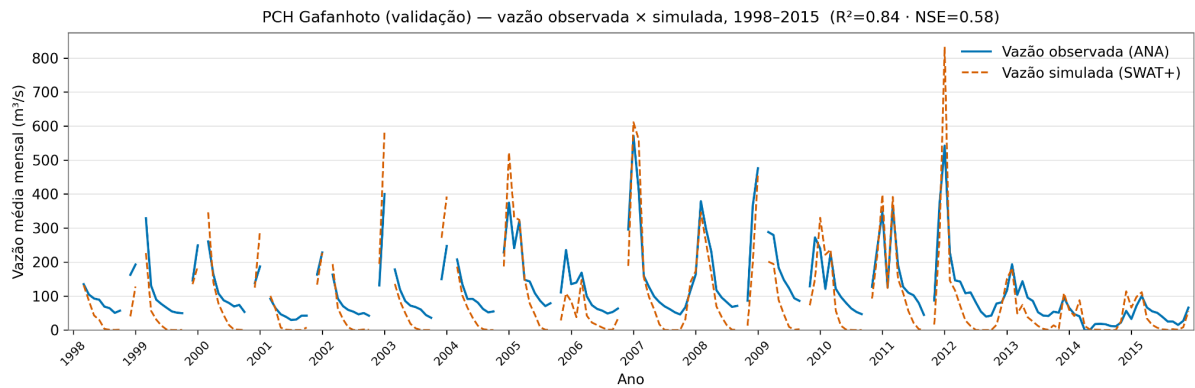
Elaborado pela autora, 2026.

Figura 9 — Dispersão entre vazão observada e simulada na estação Velho da Taipa, com reta de regressão e índices de desempenho.



Elaborado pela autora, 2026.

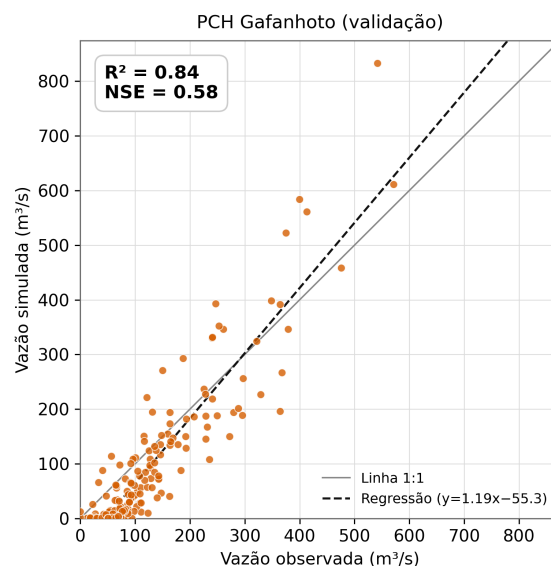
Figura 10 — Vazão mensal observada e simulada no exutório da bacia (PCH Gafanhoto), ponto de calibração (1998–2015).



Elaborado pela autora, 2026.

As discontinuidades correspondem a meses sem dado observado consistido no registro da ANA.

Figura 11 — Dispersão entre vazão observada e simulada no exutório (PCH Gafanhoto), com reta de regressão e índices de desempenho.



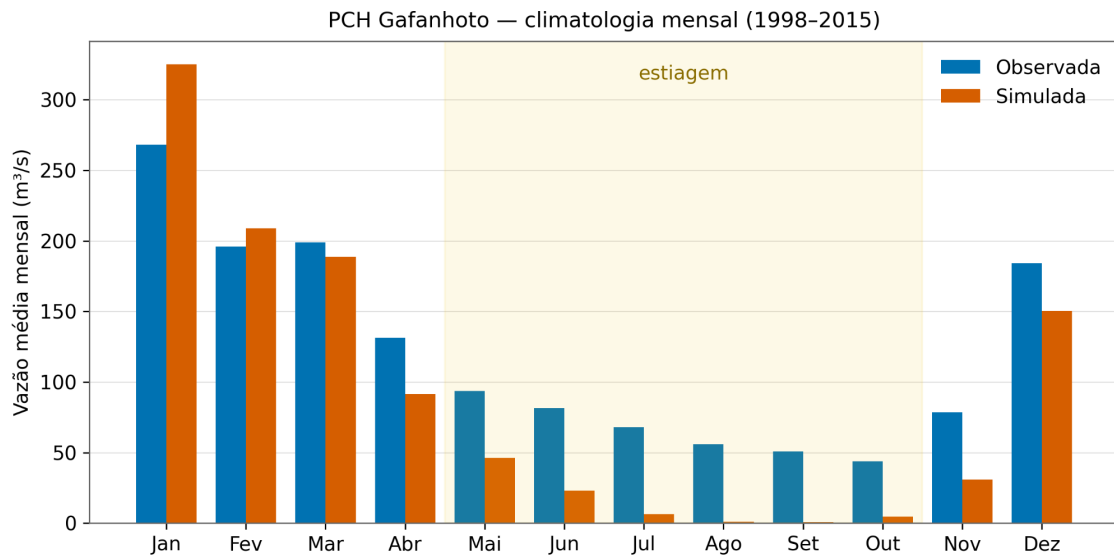
Elaborado pela autora, 2026.

O coeficiente de determinação, embora elevado (0,84), avalia apenas a correlação linear entre as séries e não garante, por si só, a qualidade do ajuste, podendo ser um indicador ilusório quando interpretado isoladamente (PALMA, 2022; UFMG, 2011). O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), por comparar o erro do modelo à variância dos dados observados em relação à reta 1:1, constitui uma métrica mais rigorosa e sensível a erros sistemáticos de magnitude. A diferença entre os valores obtidos ($R^2 = 0,84$ e $COE = 0,58$) evidencia justamente essa distinção: o modelo reproduz muito bem a forma e o momento dos eventos, mas ainda apresenta discrepâncias na magnitude de parte das vazões.

A análise dos hidrogramas confirma esse comportamento. O modelo reproduziu de forma satisfatória as vazões do período chuvoso (dezembro a março), mas subestimou a vazão de base durante a estiagem (agosto e setembro), quando a vazão simulada aproximou-se de zero, enquanto a observada manteve valores da ordem de dezenas de metros cúbicos por segundo (Figura 12). Essa limitação na representação das condições de baixa vazão é um comportamento reconhecido do modelo SWAT+, também relatado por KARDHANA et al. (2024), que identificaram dificuldade semelhante na simulação do escoamento de base em períodos secos, atribuída à representação do aquífero e à resolução dos dados de solo. Trata-se, portanto, de uma limitação de escala e da simplificação dos dados de entrada, e não de um erro de parametrização do presente trabalho.

O fato de a calibração da estação PCH Gafanhoto apresentar índices estatísticos superiores aos da Velho da Taipa, é explicado pelo efeito de escala e pela integração física dos processos na bacia. A estação PCH Gafanhoto monitora o exutório de uma área de drenagem significativamente maior (11.300 km²) em comparação a Velho da Taipa (7.350 km²). Em bacias de grande porte, os erros associados à má distribuição espacial da precipitação e às incertezas locais dos parâmetros do solo sofrem um efeito de amortecimento e compensação ao longo da rede de canais. Essa atenuação natural propaga e regulariza a série de vazões no exutório, gerando um ajuste macroscópico.

Figura 12 — Climatologia mensal da vazão observada e simulada no exutório (PCH Gafanhoto), evidenciando a subestimativa no período de estiagem.

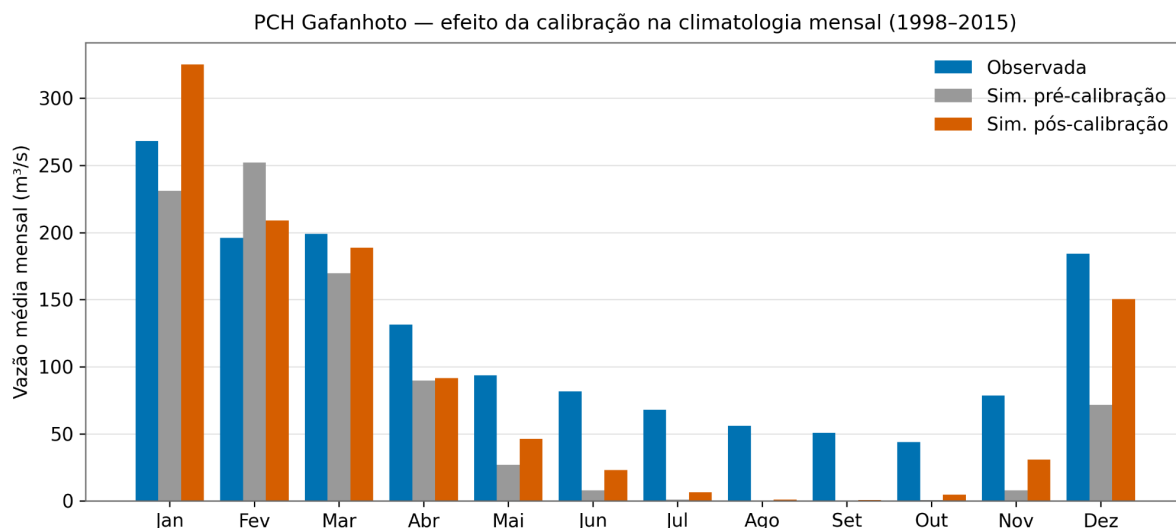


Elaborado pela autora, 2026.

Essa subestimativa acentuada do escoamento de base nos períodos de estiagem está atrelada à sensibilidade do SWAT+ na representação do aquífero raso por meio do conceito de reservatório linear. Mesmo com a calibração do parâmetro de recessão do fluxo subterrâneo para valores baixos — o que teoricamente induziria uma liberação mais lenta e perene da água —, o modelo tendeu a zerar o fluxo de base. Esse comportamento indica que o volume d'água armazenado no perfil do solo está sendo consumido de forma excessiva pela evapotranspiração real antes de recarregar o lençol freático, uma dinâmica governada pelos parâmetros de compensação de evaporação do solo e da planta. Adicionalmente, a perda de água por percolação profunda para aquíferos fraturados pode estar superestimada no modelo, reduzindo a disponibilidade hídrica que alimenta o escoamento lateral e de base em direção ao canal principal nos meses sem chuva.

Por fim, a comparação entre as simulações antes e depois da calibração (Figura 13) demonstra a efetividade do processo de ajuste, com aproximação das vazões simuladas em relação às observadas ao longo de toda a série, sobretudo nos meses de transição entre a estação chuvosa e a seca.

Figura 13 — Efeito da calibração na climatologia mensal da vazão no exutório (PCH Gafanhoto): comparação entre observado, simulado pré-calibração e simulado pós-calibração.



Elaborado pela autora, 2026.

Tabela 8 — Índices de desempenho do modelo nas estações fluviométricas (escala mensal, 1998–2015)

Estação	Canal	n (meses)	R ²	COE	Classificação (COE)*
Velho da Taipa	cha008	216	0,74	0,44	Insatisfatório
PCH Gafanhoto (exutório)	cha001	195	0,84	0,58	Satisfatório

Elaborado pela autora, 2026.

*Classificação segundo os critérios de Moriasi et al. (2007) para a escala mensal.

Com base nos critérios de desempenho propostos por Moriasi et al. (2007) para simulações em passo de tempo mensal, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE = 0,44) obtido para a estação Velho da Taipa na fase de calibração enquadra o modelo como insatisfatório (COE < 0,50). Contudo, essa métrica deve ser avaliada em conjunto com o coeficiente de determinação (R² = 0,74), que atingiu classificação considerada muito boa. O elevado valor de R² demonstra que, embora haja uma subestimação de pico ou base que penalize o COE, o SWAT+ reproduz com alta precisão a sazonalidade e a tendência temporal das vazões na

bacia. Além disso, a calibração bem-sucedida a jusante valida a consistência macroscópica da modelagem.

7 CONCLUSÃO

A aplicação da ferramenta de modelagem hidrológica SWAT+ na bacia hidrográfica do rio Pará, demonstrou ser uma metodologia consistente e eficaz para a estimativa e o monitoramento da disponibilidade hídrica regional. De forma geral, o modelo apresentou desempenho satisfatório e foi capaz de reproduzir adequadamente a forte sazonalidade e a tendência temporal das vazões observadas, capturando com precisão os ciclos de cheia e recessão ao longo do período analisado.

No exutório da bacia, representado pela estação fluviométrica PCH Gafanhoto, alcançou-se um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,84 e um COE de 0,58 na escala mensal. Esses indicadores classificam o modelo global como satisfatório de acordo com os critérios da literatura especializada (MORIASI et al., 2007). O desempenho superior obtido na PCH Gafanhoto em relação à estação interna de calibração Velho da Taipa ($R^2 = 0,74$ e $COE = 0,44$) reforça a consistência da parametrização adotada, evidenciando que os processos de propagação e atenuação do escoamento ao longo da rede de canais foram representados de forma robusta na escala macroscópica da bacia.

A análise do balanço hídrico médio simulado confirmou que a evapotranspiração constitui o principal componente de saída e perda de água na bacia do rio Pará. Esse processo respondeu por 75% do volume precipitado (correspondendo a 987 mm/ano de uma chuva média de 1312 mm/ano), refletindo a elevada demanda evaporativa e o papel determinante da cobertura vegetal regional na dinâmica hídrica do Cerrado e da Mata Atlântica.

O processo de calibração automática e a análise de sensibilidade destacaram a relevância de parâmetros que regem a distribuição interna de água no perfil do solo e no aquífero raso. Entre eles, sobressaíram-se o EPCO (*fator de compensação de absorção pela planta*, ajustado para 0,350) e o PERCO (*coeficiente de percolação*, ajustado para 0,786). O ajuste desses parâmetros foi crucial para calibrar a taxa com que a vegetação atende à sua demanda transpiratória a partir das camadas profundas do solo e o volume de água que

percola para a recarga do aquífero, modulando diretamente a partição entre evapotranspiração real e geração de vazão.

Por outro lado, o trabalho evidenciou uma limitação importante do SWAT+ na representação do escoamento de base durante o período de estiagem crítica (especialmente nos meses de agosto e setembro). Nesses meses secos, o modelo tendeu a subestimar as vazões mínimas, aproximando o fluxo simulado de zero enquanto a calha do rio mantinha vazões observadas significativas. Essa restrição decorre da simplificação conceitual do aquífero raso como reservatório linear e do consumo acelerado da umidade do solo pela evapotranspiração, constituindo o principal ponto de atenção e oportunidade para aprimoramento da modelagem.

Diante dos resultados alcançados, conclui-se que o SWAT+ se consolida como uma ferramenta de grande utilidade técnica para subsidiar o planejamento territorial, a outorga de direitos de uso da água e a gestão sustentável dos recursos hídricos no Alto São Francisco. Para trabalhos futuros, recomenda-se o refinamento da parametrização hidrogeológica dos aquíferos e a incorporação de dados de solos de maior resolução espacial, visando atenuar as incertezas na simulação das vazões de estiagem.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. *et al.* SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs - a user manual. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2015.

ALBUQUERQUE, C. G. *et al.* Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 1, p. 60–71, 2015.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Portal Hidroweb: Sistema de Informações Hidrológicas. Brasília: ANA, 2026. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 20 de junho de 2026.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

CAMBRAIA NETO, A. J.; NEIVA RODRIGUES, L. Recarga e sua importância para as águas subterrâneas e para a sustentabilidade da agricultura na região do Cerrado. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

CBH RIO PARÁ – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARÁ. A Bacia Hidrográfica do Rio Pará (UPGRH SF2). 2025. Disponível em: <https://cbhriopara.org.br/rio-para/a-bacia/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

CBHSF – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. CBH do Rio Pará (SF2 – Minas Gerais). 2025. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-para-sf2-minas-gerais/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

COELHO, G. *et al.* Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 3, p. 257–267, 2015.

Furquim, J., Lima, W., Medrado Da Silva, E., Strauch, M. and Lorz, C. (ABRH, 2013). XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos DESENVOLVIMENTO DE BASE DE DADOS DE SOLOS PARA A APLICAÇÃO DO MODELO SWAT EM BACIA DO BIOMA

CERRADO. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Sumarios/155/689a9ee93417c2aea7c60871794c65fc_70db76e7713fe8dfa3f8d4c0fea75ccb.pdf. Acesso em: 03 jan. 2026.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 ago. 2025.

IDE-SISEMA – INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Painel de Dados Geoespaciais do SISEMA. Belo Horizonte: SEMAD, 2026. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em 20 de junho de 2026.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasília: INMET, 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 20 de junho de 2026.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará: Alto Rio São Francisco, Minas Gerais: Etapa 6 – Disponibilidade Hídrica. Belo Horizonte: IGAM, 2006. 140 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Pará: Alto Rio São Francisco, Minas Gerais: Etapa 2 – Caracterização do Meio Físico. Belo Horizonte: IGAM, 2016. 107 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Bacia Hidrográfica do Rio Pará (SF2). 2025. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/w/bacia-hidrografica-do-rio-para-sf2->. Acesso em: 22 ago. 2025.

MAFRA, L. F. F., Dias, A. C. L., *et al.* ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DE VAZÕES NO RIO PARÁ: SUBSÍDIOS PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. Anais do 33º Congresso da ABES. FITABES 2025. Brasília, DF Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/1008_tema_iv.pdf Acesso em: 01 jul. 2026.

MAPBIOMAS. Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MELSEN, L. A. *et al.* The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, v. 70, n. 8, p. 1248–1259, 2025.

MOREIRA, L. L. *et al.* Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Maquiné (RS) utilizando o SWAT. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 23., 2019, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2019.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORIASI, D. N. *et al.* Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763-1785, 2015.

NEITSCH, S. L. *et al.* Soil and water assessment tool theoretical documentation: version 2009. College Station: Texas Water Resources Institute, 2011.

PEREIRA, P. U. Aplicação do modelo hidrológico SWAT na microbacia do ribeirão Ferro-Carvão, MG. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/aa232335_-919b-4995-981b-4b37b3603793> . Acesso em: 9 jun. 2026.

SHEIKHOESLAMI, R.; RAZAVI, S. Progressive Latin Hypercube Sampling: An efficient approach for robust sampling-based analysis of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, v. 93, p. 109-126, 2017.

SILVA, V. C. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CLASSES DE SOLOS BRASILEIROS: Uma abordagem prática sobre serviços ecossistêmicos. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/e4b9f804-9e2a-4590-b52a-bbe9500f1d92/content>>. Acesso em: 9 fev. 2026.

VEITH, T. L. *et al.* Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. *Transactions of the ASABE*, v. 53, p. 1477-1486, 2010.