



Serviço Público Federal  
Ministério da Educação  
**Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul**  
**Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais**



**Diego Adania Zanoni**

**MODELOS HIDROLÓGICOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES E IMPACTO  
DE MUDANÇAS NA OCUPAÇÃO DO SOLO SOBRE A DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA**

Campo Grande – MS  
Julho/2023

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Diego Adania Zaroni

MODELOS HIDROLÓGICOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES E IMPACTO  
DE MUDANÇAS NA OCUPAÇÃO DO SOLO SOBRE A DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, área de concentração: *Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos*.

**Orientador:** Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho

Aprovada em: 19/07/2023

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho  
Presidente

Profa. Dra. Maria Clara Fava  
UFV

Prof. Dr. Frederico Terra de Almeida  
UFMT

Prof. Dr. Jamil Alexandre Ayach Anache  
UFMS

Dr. André Almagro  
UFMS

Campo Grande, MS  
Julho/2023

*Para a minha amada esposa **Susana Petry Moreira** e  
nossos amados filhos **Otávio Petry Zanoni** e **Joana  
Petry Zanoni**. Por todo amor incondicional,  
encorajamento, paciência e suporte emocional.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as bênçãos que me são dadas, minhas conquistas e esperança.

Ao meu orientador Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho, por sua paciência e perseverança durante toda a minha jornada, aos seus sábios conselhos e suas palavras que me guiaram ao longo do processo inteiro do doutorado, sempre me motivando e me cobrando nas horas certas.

Aos órgãos financiadores do projeto CAPES e ANA, pelo apoio financeiro que foi de importância singular para que todo o trabalho fosse executado.

Aos colegas dos outros polos do projeto, Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza, UFMT coordenador geral do projeto, todos os colegas do laboratório do campus de Sinop, Prof. Dr. Daniel Fonseca de Carvalho, UFFRJ e Dr. Marco Aurélio Barbosa Alves, meus colegas do Rio de Janeiro, pelo apoio durante a realização do projeto.

Regina Adania Zanoni, minha mãe, João Carlos Zanoni, meu pai, Deisy Adania Zanoni, minha irmã, Daniel Adania Zanoni, meu irmão, pelo apoio emocional e toda a ajuda ao longo da minha jornada.

Susana Petry Moreira, minha esposa, Alisane Aparecida Petry Moreira, minha sogra, Ubiratan Viana Moreira, meu sogro, por toda a ajuda com os assuntos pessoais e familiares que sempre estavam presentes.

Aos amigos de laboratório, Rodrigo, Paula, Camila, Leonardo, Thiago, Glauber, Prof. Dr. Jamil, Prof. Dr. André, Jullian, Prof. Dr. Paulo, Prof. Dr. Dulce e toda a equipe do Laboratório HEroS que sempre me acolheram e me ajudaram quando eu precisei.

*“O conhecimento está disperso pela sociedade.”*

**Friedrich A. von Hayek (1899-1992)**

## MODELOS HIDROLÓGICOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES E IMPACTO DE MUDANÇAS NA OCUPAÇÃO DO SOLO SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA

**RESUMO** – As mudanças de uso e ocupação do solo vêm sendo intensificada pelo crescimento populacional, urbanização e atividades agrícolas. Essas mudanças podem ter impacto significativo no ciclo hidrológico, incluindo a variação da disponibilidade hídrica. As mudanças estão acontecendo na fronteira agrícola brasileira, esse ecótono Cerrado-Amazônia possui características únicas e muito frágeis a mudanças de temperatura e disponibilidade hídrica. Essa região está passando por substituição de áreas de floresta nativa por pastagem e agricultura. Tais mudanças estão impactando o ciclo hidrológico da região, que pode culminar em disputa pelo direito de uso da água entre as partes de interesse: agricultura, geração de energia e consumo humano. Diante deste cenário, utilizamos ferramentas de modelagem de bacias hidrológicas para avaliar se há impactos de mudanças na cobertura florestal, uso e ocupação do solo, sobre a disponibilidade hídrica. Usamos os modelos SWAT e MISDc para fazer a simulação da vazão da bacia. Em seguida, com o modelo SWAT, fizemos a mudança de uso e ocupação do solo em 6 diferentes cenários (3 cenários mais conservadores e 3 cenários mais antropizados). O SWAT teve desempenho aceitável ( $NSE=0,36$ ,  $KGE=0,70$  e  $Pbias=7,03$ ), já o modelo MISDc teve um desempenho melhor ( $NSE=0,81$ ,  $KGE=0,75$  e  $Pbias=-12,22$ ). As variações de vazão para os cenários conservadores tiveram redução de vazão em média de 13,4% e para os cenários de expansão agrícola a vazão média teve aumento de 9,7%. As mudanças de uso e ocupação do solo impactaram na vazão da bacia e nos cenários de expansão agrícola os eventos extremos, cheia e estiagem, foram intensificados.

**Palavras-chave:** Ecótono Cerrado-Amazônia, fronteira agrícola brasileira, MISDc, SWAT.

## HYDROLOGICAL MODELS TO ESTIMATE FLOW AND IMPACT OF CHANGES IN LAND USE/LAND COVER ON WATER AVAILABILITY

**ABSTRACT** – Changes in land use and land cover have been intensified by population growth, urbanization and agricultural activities. These changes can have a significant impact on the hydrological cycle, including variations in water availability. Changes are happening on the Brazilian agricultural frontier, this Cerrado-Amazonia ecotone has unique characteristics and is very fragile to changes in temperature and water availability. This region is undergoing the replacement of native forest areas with pasture and agriculture. Such changes are impacting the hydrological cycle of this region, which could culminate in disputes over the right to use water between the parties of interest: agriculture, energy generation and human consumption. Given this scenario, we use hydrological basin modeling tools to assess whether there are impacts of changes in forest cover, land use and occupation, on water availability. We used the SWAT and MISDc models to simulate the flow of the basin. Then, with the SWAT model, we changed land use and occupation in 6 different scenarios (3 more conservative scenarios and 3 more anthropogenic scenarios). SWAT had an acceptable performance (NSE=0.36, KGE=0.70 and Pbias=7.03), while the MISDc model had a better performance (NSE=0.81, KGE=0.75 and Pbias=-12,22). The flow variations for the conservative scenarios had an average flow reduction of 13.4% and for the agricultural expansion scenarios the average flow increased by 9.7%. Changes in land use and occupation impacted the flow of the basin and in scenarios of agricultural expansion, extreme events, floods and droughts, were intensified.

**Keywords:** Brazilian agricultural frontier, Cerrado-Amazon ecotone, MISDc, SWAT.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivo Geral .....	16
2.1 Objetivos Específicos .....	16
3. Revisão Bibliográfica.....	16
3.1. Mudanças no uso do solo na transição Cerrado-Amazônia.....	16
3.2. Modelagem hidrológica.....	18
3.2.1. O modelo SWAT.....	19
3.2.2. O modelo MISDC .....	20
4. Material e Método .....	21
4.1 Área de estudo.....	21
4.2 Simulação no modelo SWAT.....	23
4.3 Simulação no modelo MISDC .....	25
4.4 Cenários de uso e ocupação do solo .....	27
5. Resultados .....	28
6. Discussões .....	34
7. Conclusões.....	40
8. Referências .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de MISDc. ....	21
<b>Figura 2</b> - Região de estudo, bacia do rio Teles Pires.....	22
<b>Figura 3</b> - Parâmetros para a simulação no modelo SWAT. ....	24
<b>Figura 4</b> - Fluxograma de execução do modelo SWAT e a etapa de calibração manual com o retorno para a criação das tabelas de dados de entrada. ....	25
<b>Figura 5</b> - Mapa de solos da bacia do Alto Teles Pires ( <b>a</b> ) e Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Teles Pires ( <b>b</b> ).....	29
<b>Figura 6</b> - Resultado da modelagem de vazão da bacia do Alto Teles Pires, usando o modelo SWAT, comparando os valores observados com os valores simulados e calibrados. ....	30
<b>Figura 7</b> - Calibração e validação da simulação de vazão da bacia do Alto Teles Pires, usando o modelo MISDc. ....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Parâmetros utilizados no modelo MISDc, descrição e variação de cada parâmetro. ..	26
Tabela 2 - Valores mínimos para os coeficientes NSE e KGE. ....	27
Tabela 3 - Descrição dos cenários propostos para as mudanças de uso e ocupação do solo na bacia. .....	27
<b>Tabela 4</b> - Áreas de reserva legal segundo a Lei 12.651/2012. ....	28
Tabela 5 - Valores dos coeficientes NSE, KGE e Pbias antes e depois da calibração manual. ....	31
<b>Tabela 6</b> - Valores dos coeficientes estatísticos do modelo MISDc, calibrado e validado para a bacia. ....	31
<b>Tabela 7</b> - Vazões mínimas, máximas e médias da bacia do Alto Teles Pires, para cada cenário de mudança de uso do solo com o avanço da fronteira agrícola. ....	32
<b>Tabela 8</b> - Vazões mínimas, máximas e médias da bacia do Alto Teles Pires, para cada cenário de mudança de uso do solo de forma conservadora. ....	32
<b>Tabela 9</b> - Valores das componentes de vazão e recargas de aquífero. ....	33

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas  
AWC – Available Water Capacity  
b – fator de correção da evapotranspiração  
CFSR – Climate Forecast System Reanalysis  
CREAMS – Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems  
CX - Cambissolo háplico argila de atividade baixa distrófico  
EIA – Estudos de Impacto Ambiental  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EPIC – Erosion-Productivity Impact Calculator  
ET – Evapotranspiração  
HEC-GeoHMS - Hydrologic Engineering Center – Geospatial Hydrologic Modeling Extension  
HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System  
HEC-GeoRAS - Hydrologic Engineering Center – Geographic River Analysis System  
HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center – River Analysis System  
HRU – Hidrologic Response Unit  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
IPH-II – Instituto de Pesquisas Hidráulicas II  
KGE – Kling-Gupta efficiency  
Ks – Condutividade hidráulica saturada  
LVA – Latossolo vermelho-amarelo distrófico  
m – Expoente de drenagem  
MDEHC – Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado  
MGB-IPH – Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
MISDc – Modello Idrologico Semi-Distribuito in contínuo  
NSE – Nash-Sutcliffe efficiency  
Nu – Proporção entre drenagem e infiltração  
OLI – Operational Land Imager  
P – Precipitação  
Pbias – Percentage BIAS  
PV – Argilossolo vermelho distrófico  
Qméd – vazão média

Qobs – vazão observada  
Qsim – vazão simulada  
RQ – Neossolo quartzarênico órtico  
RU – Neossolo flúvico argila de atividade baixa distrófico  
T – Temperatura  
t – Tempo  
TOPMODEL – Topography-Based Hydrological Model  
RR – Rainfall-Runoff  
S – Saturação  
SAC-SMA – Sacramento – Soil Moisture Accounting  
SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure  
Sr – parâmetro de relação entre S e W(t)  
SWAT – Soil and Water Assessment Tool  
SWB – Soil Water Balance  
SWRRB – Simulator for Water Resources in Rural Basins  
UHE – Usina Hidrelétrica  
USDA-ARS – United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service  
USGS – United States Geological Survey  
WGen – Weather Generator Data  
Wmáx – Capacidade máxima de água no solo  
ZSEE-MT – Zoneamento socioeconômico Ecológico do estado de Mato Grosso  
 $\gamma$  – tempo de atraso  
 $\lambda$  – coeficiente de abstração inicial  
 $r$  – Correlação linear entre os valores observados e simulados  
 $\sigma_{sim}$  – desvio padrão das vazões simuladas  
 $\sigma_{obs}$  – desvio padrão das vazões observadas  
 $\mu_{sim}$  – média das vazões simuladas  
 $\mu_{obs}$  – média das vazões observadas

## 1. Introdução

Dentre os estados brasileiros, Mato Grosso destaca-se por sua grande extensão territorial e inserção na área de ocorrência dos cerrados brasileiros, da floresta tropical úmida e da planície do pantanal, e por suas áreas de transição. Estes biomas propiciam grande diversidade de situações ecológicas, sociais, econômicas, culturais e de processos de produção e desenvolvimento rural e agroindustrial (SOUZA et al, 2013). A posição geográfica, associada a fatores climáticos, geológicos, pedológicos, fitoecológicos, geomorfológicos e hídricos, condiciona grande complexidade ambiental ao Estado, onde se sucedem o Complexo do Pantanal no Sul, as formações savânicas (cerrado) na região Centro-Sul, uma variedade de ambientes de transição ecológica na região central e, finalmente, as formações amazônicas no Norte. Associados às políticas públicas e às variáveis socioeconômicas, que dirigiram os processos de ocupação do Estado, estes vários ambientes condicionaram, historicamente, diferentes dinâmicas e características do uso e ocupação do solo (SEPLAN, 2017).

As principais atividades econômicas primárias do estado são a produção agropecuária e o extrativismo, vegetal e mineral, que foi baseado, até alguns anos atrás, fundamentalmente para a incorporação de novas áreas para o setor agropecuário. Nos últimos anos, entretanto, as restrições mundiais com relação à utilização de áreas de florestas para produção agrícola, têm alterado o cenário de crescimento da produção e a sua distribuição pelo estado. Para garantir produção em grande escala, o modelo de agricultura desenvolvido no estado combina monocultura (com sistemas de sucessão safrinha), mecanização, uso intensivo de fertilizantes e produtos de tratamento fitossanitários (THEODORO, 2002).

Nesse contexto, o Estado do Mato Grosso assumiu papel de destaque no cenário nacional e internacional, ora por apresentar elevados índices de crescimento econômico, produção agrícola e pecuária, ora por ser apontado como o responsável por uma das maiores taxas de erradicação da cobertura vegetal natural, sobretudo no cerrado e na floresta tropical úmida, a Amazônia. Esse segundo cenário, coloca o estado como responsável por um dos maiores índices anuais de ocorrência de queimadas do país e, conseqüentemente, contribuinte para grandes problemas ambientais decorrentes de atividades antrópicas.

Por outro lado, o fato de apresentar grande diversidade de situações ecológicas, fundiárias, econômicas, entre outras, amplia as possibilidades para o estabelecimento das análises e discussões

sobre as variáveis determinantes da dinâmica do desenvolvimento dos sistemas agrícolas e dos impactos ambientais gerados no Estado, sobretudo na área de recursos hídricos.

O zoneamento socioeconômico ecológico do estado de Mato Grosso (ZSEE-MT) define três unidades hidrográficas inseridas no território (SEPLAN, 2018). As regiões hidrográficas do Paraguai, Amazônica e Tocantins-Araguaia, com áreas de 176.800, 593.310 e 132.238 km<sup>2</sup>, respectivamente, que abrangem 19,6; 65,7 e 14,7% da superfície estadual. Especificamente na porção da região Amazônica do Estado, destacam-se as bacias hidrográficas dos rios Teles Pires (142.600 km<sup>2</sup>), Juruena (181.367,9 km<sup>2</sup>) e Xingu (176.800,41 km<sup>2</sup>) (SEPLAN, 2017). O rio Teles Pires apresenta extensão total de 1.481 km, com nascente nas Serras Azul e Finca Faca (Paranatinga – MT), altitude de 800m, desenvolvimento no sentido SE-NW com confluência com Rio Tapajós à altitude aproximada de 95 m.

Apesar de estar hidrologicamente situada na região amazônica, a bacia do Rio Teles Pires apresenta variações quanto à cobertura vegetal, com predomínio de formações savânicas (bioma Cerrado), florestas transicionais (contato entre floresta ombrófila, floresta estacional e savana) e floresta tropical ombrófila (bioma Amazônico), nas regiões do Alto, Médio e Baixo Teles Pires, respectivamente. Essas mesmas regiões hidrológicas correspondem a 26,2; 57,7 e 16,1% da área da bacia do rio Teles Pires, com ocupação em torno de 45,9; 27,5 e 26,6% da população total da bacia e são responsáveis por 66,3; 18,7 e 15,0% do PIB obtido na área do rio Teles Pires, respectivamente (EPE, 2009).

Embora com considerável notoriedade agrícola no contexto nacional e internacional, a bacia do rio Teles Pires ainda carece de estudos que apresentem informações atuais sobre a dinâmica do uso e cobertura do solo e suas influências na disponibilidade dos recursos hídricos nas áreas de fronteira agrícola do estado de Mato Grosso. Essas informações podem fornecer subsídios para a gestão dos recursos hídricos e planejamento das atividades agropecuárias, além de subsidiar e avaliar o impacto da regional da implantação de empreendimentos hidrelétricos.

Em cenário futuro, apesar da alta disponibilidade hídrica superficial, vislumbra-se potencialidade para geração de conflitos pelo uso da água. A região do Alto e Médio Teles Pires tem sua economia praticamente voltada ao agronegócio, e está entre os 16 principais polos nacionais de irrigação por pivô central, possuindo potencial de aumento da área irrigada, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2016). Adicionalmente, nestas sub-bacias ocorre parte significativa da produção de grãos do estado, onde estão inseridos alguns dos municípios com

maior expressão agrícola do País, como Lucas do Rio Verde, Sorriso, Sinop e Nova Mutum. De acordo com a SEPLAN (2017), os municípios inseridos, total ou parcialmente, nas sub-bacias do Alto e Médio Teles Pires representam mais de 17% do PIB de Mato Grosso.

Além da área irrigada, a bacia do rio Teles Pires possui potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 3.600 MW compreendido em seis aproveitamentos hidrelétricos (EPE, 2009), o que requer ainda mais conhecimentos quali-quantitativos sobre disponibilidade hídrica e previsão de eventos extremos. Dentre os barramentos previstos, quatro já se encontram em fase de implantação e/ou finalização das obras, com destaque para a UHE Teles Pires em Paranaíta-MT (1820 MW e área do reservatório de 151,8 km<sup>2</sup>), UHE Colíder em Colíder-MT (342 MW e área do reservatório de 171,7 km<sup>2</sup>), UHE São Manoel em Paranaíta-MT (746 MW e área do reservatório de 53,0 km<sup>2</sup>) e UHE Sinop (461 MW e área do reservatório de 329,6 km<sup>2</sup>) (FEARNSSIDE, 2015). Destaca-se ainda que o município de Sinop-MT se apresenta como divisor entre as regiões do Alto e Médio Teles Pires.

Pela importância socioeconômica e ambiental da região do Alto e Médio Teles Pires para o estado de Mato Grosso, e pelas potencialidades de conflitos nas diferentes formas de uso da água, depreende-se que a compreensão dos processos hidrológicos ocorrentes na região subsidiará estudos ambientais, a gestão dos recursos hídricos e projetos de obras hidroagrícolas, pois permitirá verificar a disponibilidade hídrica, a ocorrência de eventos extremos - como secas e inundações - e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes.

Em geral, os avanços no planejamento e gestão dos recursos hídricos são dependentes de dados e informações para a elaboração dos planos de bacias, assim, ações em prol da implantação, ampliação e melhorias no monitoramento quali-quantitativo são essenciais em todo o processo. O quadro de baixa densidade da rede hidrometeorológica é, infelizmente, característica da região Amazônica brasileira, devido às dificuldades de acesso e à diversidade e extensão das paisagens (LATUF, 2011).

Neste contexto, a modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para obter conhecimento mais aprofundado a respeito dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de cenários (MORAES, 2003). A modelagem matemática permite representar o comportamento de fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, possibilitando estimar o impacto de anomalias climáticas e de mudanças na ocupação do solo sobre os recursos hídricos (MELLO et al., 2016).

Os modelos hidrológicos têm sido utilizados como ferramenta para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (DEVIA et al., 2015). O uso de modelo hidrológico requer a acurácia de suas estimativas. Tais estimativas podem ser utilizadas por instituições operadoras de estações fluviométricas para análise de consistência e preenchimento de falhas de dados de vazão; empreendimentos hidrelétricos para gestão de reservatórios e elaboração do programa de operação das usinas; órgãos gestores para elaboração de cenários de planejamento e gestão dos recursos hídricos bem como para previsão e mitigação de eventos extremos. A simulação hidrológica em bacias com intensa produção agrícola representa importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos, principalmente para a caracterização das vazões passíveis de serem outorgadas para projetos de irrigação.

No âmbito do setor elétrico, Gomes et al. (2010) afirmam que a previsão de vazões afluentes aos reservatórios permite que os diferentes modelos de operação, otimização e simulação energética possam ser utilizados para avaliar as condições operacionais das usinas hidrelétricas. Estas previsões de vazões permitem que sejam tomadas decisões que minimizem o efeito de eventos extremos e maximizem a utilização do volume de espera dos reservatórios, desde que realizadas com relativa exatidão e antecedência.

Existe grande número de modelos hidrológicos, com características únicas e aplicações específicas (DEVIA et al., 2015). Dentre os modelos hidrológicos que têm sido utilizados com frequência para aplicações na engenharia de recursos hídricos destacam-se: *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*, *Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS)*, *River Analysis System (HEC-RAS)*, *Geographic River Analysis System (HEC-GeoRAS)*, *Tank Model*, *Topography-Based Hydrological Model (TOPMODEL)*, *Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP)*, *Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH)*, *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*, *Instituto de Pesquisas Hidráulicas II (IPH II)*, *Modello Idrologico Semi-Distribuito in continuo (MISDc)* e o *Sacramento - Soil Moisture Accounting (SAC-SMA)*. Dos diversos modelos hidrológicos existentes, o SWAT tem se mostrado adequado para previsão de impactos decorrentes da mudança de ocupação do solo e mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, magnitude de eventos extremos e produção de sedimentos em bacias hidrográficas agrícolas, conforme Lubitz et al. (2013), Pereira et al. (2014), Pereira et al. (2016) e Rodrigues et al. (2015). O modelo SWAT é conceitual (pois é baseado nas propriedades físicas da bacia), determinístico (não depende de aleatoriedade nos seus cálculos e para cada conjunto de dados de entrada gera um conjunto de dados de saída igual),

semidistribuído (gera informação para a bacia como um todo ou para parte específica caso seja necessário) e contínuo (devido ao fato de basear-se em longas séries históricas e gerar resultados diários por longos períodos). No entanto é um modelo robusto que necessita de combinação e disponibilidade de dados, às vezes impedindo a execução plena do modelo. O SWAT apresenta bons resultados para previsão de impactos decorrentes da mudança de ocupação do solo e mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, magnitude de eventos extremos e produção de sedimentos em bacias hidrográficas agrícolas (DOS R. PEREIRA et al., 2016, RODRIGUES et al., 2015).

Por outro lado, o *Modello Idrologico Semi-Distribuito in continuo* (MISDc), por ser menos robusto que o SWAT, é mais simples e necessita de apenas duas variáveis para realizar a simulação: precipitação (P) e Temperatura (T). Essas variáveis devem ser configuradas e formatadas para a entrada no modelo. Elas precisam ser dados de valores únicos que representam a bacia como um todo. Com esses dados formatados a simulação pode ser implementada.

A modelagem hidrológica em grandes bacias hidrográficas ainda é um desafio e difere em alguns aspectos daquela associada a pequenas áreas de drenagem. Em grandes bacias, como a do Rio Teles Pires, a alta variabilidade do relevo, do clima, da ocupação do solo e de suas características físico-hídricas requerem abordagem diferente, visto que se torna inviável a coleta dessas informações para toda a sua extensão devido às limitações técnicas, econômicas e operacionais.

Como saída para esse problema podem-se utilizar informações de bacias experimentais que tenham características edafoclimáticas semelhantes à da área maior. A adoção de bacias experimentais, com a execução de campanhas regulares para obtenção de parâmetros hidrometeorológicos e do solo favorece o entendimento do sistema. Além disso, o desenvolvimento de metodologias que objetivam realizar parametrizações físicas do modelo matemático e a transferência de informações entre bacias de diferentes escalas também são necessárias. Embora os estudos de modelagem hidrológica tenham ganhado força no Brasil nos últimos anos, ainda existe grande carência de pesquisas para as diferentes condições (biomas) do País, com destaque especial para as regiões do centro-norte do Brasil, onde tais estudos são escassos ou mesmo inexistentes.

Pelo contexto da bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, a escassez de pesquisas e, conseqüentemente, de informações para a tomada de decisão comprometem a gestão sustentável

da água e do solo em uma das principais regiões de expansão agrícola do País, que porventura, apresenta sinais emite de conflitos de uso da água. Aliado a isso, em 2016, o Ibama por meio dos estudos de impacto ambiental (EIA), apontou que a bacia do Rio Teles Pires dispõe de uma rede de estações climatológicas pequena e espacialmente mal distribuída, o que compromete a realização de estudos de efeitos sinérgicos dos aproveitamentos hidrelétricos na região, principalmente vinculados ao transporte de sedimentos. Assim, pela característica da bacia e sua importância no contexto que representa, neste estudo avaliaremos se há impacto de mudanças na cobertura florestal sobre a disponibilidade hídrica.

## **2. Objetivo Geral**

Avaliar se há impacto de mudanças na ocupação do solo sobre a disponibilidade hídrica em bacia hidrográfica inserida no ecótono Cerrado-Amazônia.

### **2.1 Objetivos Específicos**

a) Estimativa de vazão com os dados restritos disponíveis usando o modelo *Water Assessment Tool (SWAT)* e outro modelo mais simplificado, o *Modello Idrologico Semi-Distribuito in continuo (MISDc)*;

b) Avaliar se diferentes cenários de uso e ocupação do solo alteram o regime de vazões.

## **3. Revisão Bibliográfica**

### **3.1. Mudanças no uso do solo na transição Cerrado-Amazônia**

A zona de transição entre Cerrado e Amazônia não é uma simples faixa de transição que pode ser delimitada como apenas uma linha. Esses biomas se misturaram de forma complexa e criaram grande biodiversidade, com condições locais únicas. Essa zona de transição é considerada o maior ecótono tropical do mundo (TORELLO-RAVENTOS et al., 2013).

A biodiversidade que surgiu nessa zona de transição possui uma sensibilidade maior às mudanças, seja de uso e ocupação do solo, seja por disponibilidade hídrica. Foi observado que houve aumento no índice de mortalidade das árvores devido aos eventos extremos de seca, no ecótono da Amazônia (região sul) e Cerrado, sendo essa região a mais seca da Amazônia, (ESQUIVEL-MUELBERT et al. 2020). A região de transição Cerrado-Amazônia vem passando por processo acelerado de desmatamento para implementação de agricultura e pastagem nas últimas décadas, essas ações antrópicas aumentaram mais de 25% de áreas agrícolas entre os anos

de 1986 e 2014 (ZAIATZ et al. 2018), o que resultou em mudanças significantes no balanço hídrico da região.

A substituição das áreas Cerrado-Amazônia por agricultura e pastagem causam impacto no balanço hídrico da região e na temperatura do solo no local. Essa mudança de uso e ocupação do solo diminui a evapotranspiração em até 44%, por outro lado a recuperação de áreas degradadas proporcionam aumento na evapotranspiração de até 15% (RODRIGUES et al., 2022). A agricultura moderna é altamente tecnológica e mecanizada com o foco em alta produtividade. Essa prática se aplicada sem que se considere a fragilidade dos recursos naturais, resulta em diminuição na disponibilidade hídrica e degradação do solo. Essas mudanças no uso e ocupação do solo causam degradação hidrofísica, alteram sua porosidade e têm como consequência o aumento do escoamento superficial. Essa variação impacta na vazão do rio e agrava os eventos extremos, de cheia ou de seca, aumentando a vazão durante o período de cheia e diminuindo a vazão no período de seca (NÓBREGA et al., 2017).

As leis atuais de uso e ocupação do solo ainda não conseguiram controlar e ordenar a expansão da fronteira agrícola. O código florestal vigente no Brasil (Lei 12.651/2012) define as áreas de preservação conforme o bioma em que a propriedade está localizada, sendo de 20% na região de Cerrado, 35% na zona de transição Cerrado-Amazônia e 80% na região da Amazônia. Isto possibilita o desmatamento legal de aproximadamente 40 Mha de vegetação nativa (RODRIGUES et al., 2022). Mudanças dessa magnitude na biodiversidade da região poderiam levar a grandes impactos na região, como o aumento da temperatura da superfície, diminuição da evapotranspiração e eventos extremos mais frequentes (COHN et al., 2019).

A vegetação natural da região vem sendo substituída por pastagem e posteriormente por agricultura, essas mudanças destacaram a importância da região devido ao aumento na produção de grãos. Consequentemente o monitoramento do avanço do desmatamento na região do Cerrado se torna mais difícil devido à grande extensão territorial do bioma, à sazonalidade e à mudança de cobertura de forma rápida e dinâmica. Uma das regiões que podem ser afetadas por essas mudanças é a bacia do rio Teles Pires, que está localizada nos estados de Mato Grosso e Pará, e é um dos principais afluentes do rio Tapajós, que por sua vez é um dos principais afluentes do rio Amazonas.

A região do rio Teles Pires tem grande participação na economia local, agricultura e pecuária, e na geração de energia hidrelétrica. A agricultura irrigada em larga escala impacta na

extração da água para irrigação, que vem crescendo rapidamente. Junto com o uso industrial e abastecimento podem comprometer o uso sustentável de água na bacia. Devido a esses conflitos de uso e interesse sobre o uso da água, estudos relacionados à disponibilidade hídrica se tornam essenciais.

### **3.2. Modelagem hidrológica**

Devido à necessidade de representar e observar os processos físicos da natureza em simulações, para que fosse possível observar o cenário atual e projetar cenários futuros, surgiram os modelos hidrológicos. Esses modelos reproduzem os fenômenos da natureza de forma mais simplificada. Os modelos variam em relação à complexidade, podem exigir poucas ou muitas informações e acabam definindo onde podem ser aplicados ou não.

Os modelos hidrológicos servem para a representação da vazão nos rios, para o transporte de sedimentos, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, recarga de aquíferos entre muitos outros fenômenos. O objetivo da modelagem é compreender melhor os fenômenos da natureza e prever cenários futuros, possibilitando assim dados para fomentar as medidas de uso e ocupação e para tomadas de decisão (CARVALHO NETO; SRINIVASAN; RUFINO, 2011).

Os modelos hidrológicos estão em constante evolução. Os primeiros modelos tinham algumas limitações temporais devido à complexidade matemática envolvida e à capacidade de processamento dos dados. Com modelos matemáticos mais avançados, fenômenos complexos podem ser estudados, como vazões diárias, transporte de sedimentos, disponibilidade hídrica, de forma distribuída, gerando mapas com muita informação, ou de forma concentrada, gerando informação para a bacia como um todo.

Esses avanços proporcionaram outros benefícios como a facilidade de execução de projetos, custo reduzido e resultados em menos tempo, possibilitando o estudo de vários cenários diferentes de forma ágil. Muitos deles não explorados em experimentos reais devido à dificuldade de execução, viabilizando assim a elaboração de estudos de impacto ambiental (FERNANDES; GALVINCIO; FREIRE, 2012).

Os modelos hidrológicos podem variar da forma que geram os dados contínuos ou discretos. Cada modelo tem suas aplicações, vantagens e desvantagens. As vantagens dos modelos discretos são a facilidade para obter, formatar e gerar dados de entrada; como desvantagem, apresentam dados de forma geral da bacia. Os modelos contínuos apresentam resultados mais detalhados, sendo possível localizar espacialmente ou temporalmente algum fenômeno. Como desvantagem,

necessitam de capacidade de processamento maior, assim como de mais dados de entrada, (CARVALHO NETO; SRINIVASAN; RUFINO, 2011).

### 3.2.1. O modelo SWAT

A sigla SWAT, em língua portuguesa significa “Ferramentas de Avaliação de Solo e Água”. Este modelo foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold para o USDA-ARS (*United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service*). O projeto foi criado para previsão das práticas de gestão do solo que interferem diretamente na quantidade de água da bacia hidrográfica, produção de sedimentos e químicos agrícolas em grandes bacias hidrográficas com diferentes solos e uso e manejo de solo durante longos períodos (NEITSCH et al., 2005). Trata-se de um modelo físico que é utilizado em escala espacial de bacias hidrográficas e que leva em consideração condições topográficas da bacia hidrográfica, uso e ocupação do solo e clima para modelagem hidrológica (DURÃES et al., 2011).

O modelo SWAT é a combinação de mais de 30 anos de pesquisa. Esse modelo incorporou vários modelos como, SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*), EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*). A utilização do SWAT tem como objetivo principal a análise hidrológica de bacias hidrográficas relacionada à produção e transporte de sedimentos assim como o monitoramento de vazão (ZHANG et al., 2009; DURÃES et al., 2011; ALMEIDA et al., 2018; HIMANSHU et al 2019). Também é utilizado na simulação de transporte de poluentes (LIU et al., 2018; ABDULLAH et al., 2019), monitoramento do transporte de nutrientes em rios (HIMANSHU et al 2019), perda de fósforo para águas subterrâneas (BAUWE et al., 2019; ENGBRETSSEN et al., 2019) e efeito de mudanças climáticas em bacia hidrográfica (BHATTA et al., 2019).

Com relação à simulação da produção de sedimentos em bacia hidrográfica, o SWAT é considerado um dos modelos mais indicados para estudo dos efeitos do uso e manejo do solo e perdas de solo, sobretudo em bacias sem histórico de monitoramento. Para modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT são necessários dados relacionados à área da bacia hidrográfica, área de sub-bacias hidrográficas, unidade de resposta hidrológica (HRU), reservatórios, classes de solo, clima e dados de cobertura vegetal de acordo com o uso e ocupação do solo (ZHANG et al., 2009). Além disso, como dados de entrada são necessárias informações sobre radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, temperatura máxima e mínima, precipitação e a localização das

estações de monitoramento. Com estes dados, estima-se a evapotranspiração por meio da equação de Penman-Monteith FAO 56.

### 3.2.2. O modelo MISDC

O Modelo Idrológico Semi-Distribuído *in continuo* (MISDC) é composto por duas etapas principais: um *Soil Water Balance* (SWB) modelo para simular o padrão temporal de umidade do solo, e um modelo *Rainfall-Runoff* (RR) semidistribuído baseado em eventos (MISD) para simulação de inundação. Ao combinar os dois modelos por meio de uma relação derivada experimentalmente, a estrutura de um modelo RR contínuo envolvendo o menor número de variáveis foi derivado. Análise da influência da Condição de Umidade Antecedente (AWC) na resposta hidrológica de bacias hidrográficas na área de estudo é o principal motivo para a seleção deste tipo de estrutura do modelo (BROCCA; MELONE; MORAMARCO, 2011). Estimativa precisa do AWC pode fornecer boa simulação do hidrograma de inundação, mesmo que em modelo RR, baseado em eventos relativamente simples, seja empregado (BROCCA et al., 2009). Portanto, a metodologia usada para MISDC o desenvolvimento da estrutura é baseado nas seguintes etapas:

a) Análise detalhada das variáveis físicas (infiltração, evapotranspiração e drenagem) que contribuem para o SWB. Esta análise é baseada em medições de umidade do solo obtidas de um sistema automático;

b) Modelo RR baseado em eventos (MISD) implementado e testado em grande número de eventos de inundação, e em várias bacias hidrográficas. No modelo, o parâmetro vinculado a AWC foi definido igual ao valor otimizando o direto reprodução do volume de escoamento;

c) Combinação os modelos SWB e MISD explorando a relação entre o parâmetro que representa o AWC no modelo MISD e medições de umidade do solo.

O diagrama esquemático, (Figura 1), ilustra essas etapas. No esquerdo é representado o modelo de umidade do solo, que mostra a saturação que vira escoamento superficial ( $S(t)$ ), e do lado direito o modelo MISD representa as etapas de escoamento.

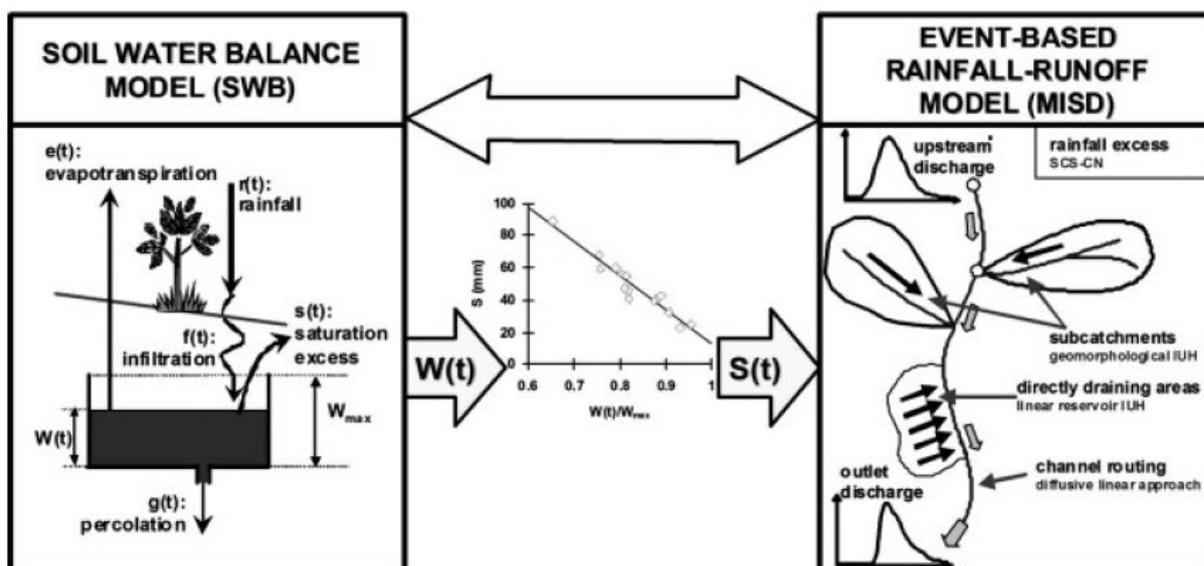


Figura 1 - Diagrama esquemático de MISDc. Adaptado de (BROCCA; MELONE; MORAMARCO, 2011).

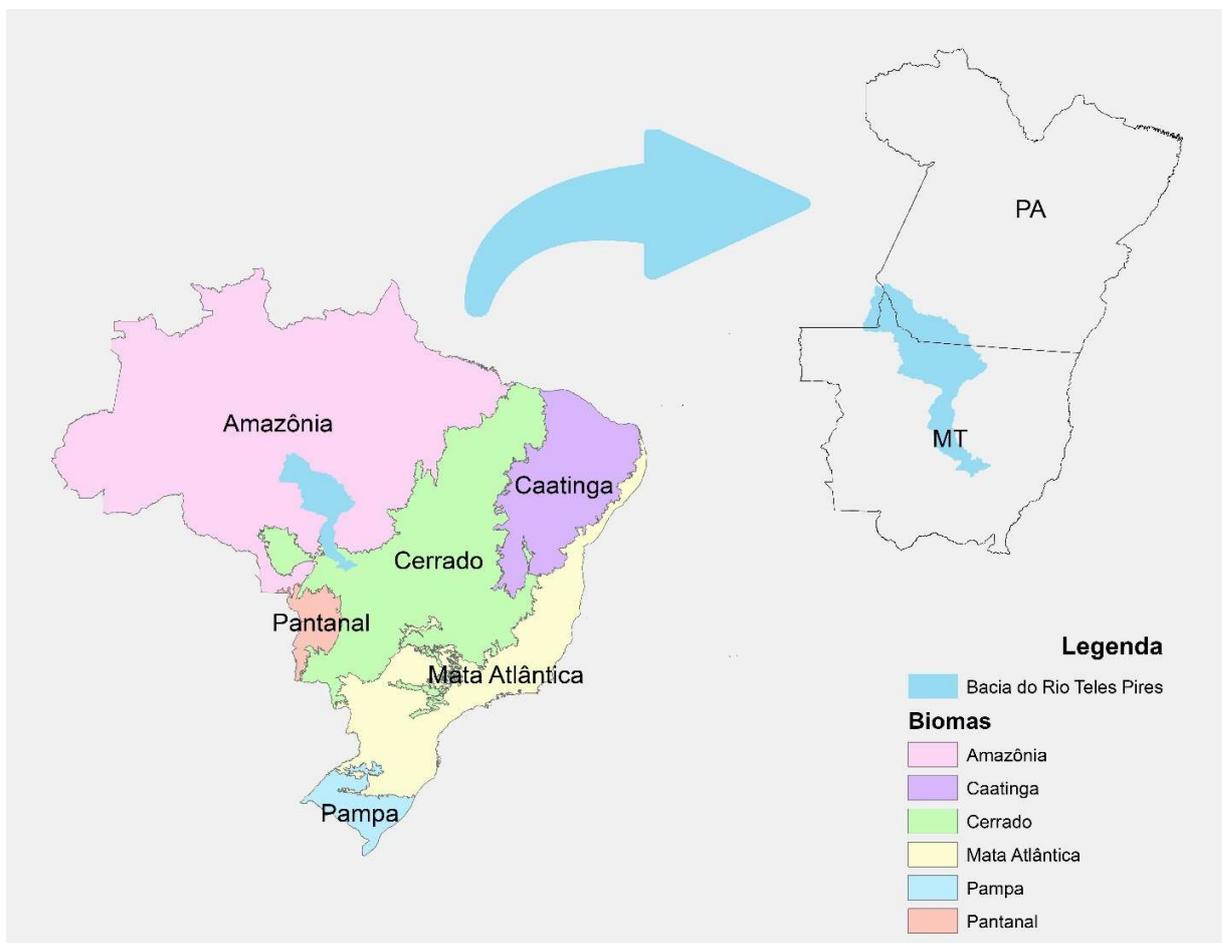
A estrutura do modelo de balanço hídrico do solo (SWB) e o modelo de fluxo pluvial baseado em eventos (MISD) são mostrados à esquerda e à direita, respectivamente, neste mesmo diagrama (Figura 1). A relação experimental que liga a saída do modelo SWB,  $W(t)$ , e as condições iniciais de MISD,  $S(t)$ , é mostrado na parte central da figura.

Este modelo foi proposto em 2011 e com mais aplicações em estudos algumas evoluções foram aplicadas nele, como a utilização de dados de satélite para a obtenção de dados (umidade do solo, por exemplo), conforme visto em (MASSARI et al., 2015; MASSARI et al., 2018), para gerenciamento de risco de enchentes (BROCCA et al., 2013) e para simulações de cenários futuros (CAMICI et al., 2014).

## 4. Material e Método

### 4.1 Área de estudo

A área de estudo foi a bacia do rio Teles Pires (Figura 2), que possui 3 partes: Alto, Médio e Baixo Teles Pires. A maior parte da bacia se localiza no Mato Grosso sendo que uma pequena parte fica no sul do Pará. A bacia total possui cerca de 140.000 km<sup>2</sup> e a área de estudo foi a bacia Alto Teles Pires, que possui cerca de 36.000 km<sup>2</sup>. O rio Teles Pires quando faz junção com o rio Juruema forma o rio Tapajós, que é um dos maiores afluentes do Rio Amazonas.



**Figura 2** - Região de estudo, bacia do rio Teles Pires.

A bacia está localizada na região de transição do bioma Cerrado para o bioma Amazônia. Representa a região da fronteira agrícola, que causa mudanças aceleradas em relação ao uso e ocupação do solo, gerando interesse de vários segmentos como: terras indígenas, agricultura, pecuária, produção de energia e abastecimento de água. Nesta bacia está localizada o complexo Teles Pires, que é composto pelas usinas: UHE São Manoel (700 MW), UHE Teles Pires (1820 MW), Usina Hidrelétrica de Colíder (300 MW), UHE Sinop (401 MW), UHE Magessi (53 MW, planejada) e UHE Foz do Apiacás, no rio Apiacás, principal afluente do rio Teles Pires (275 MW).

## 4.2 Simulação no modelo SWAT

O modelo SWAT necessita dos seguintes dados de entrada: modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC), mapa de uso e ocupação do solo, mapa de solos da bacia com as respectivas características, dados climáticos (velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura e precipitação e dados de vazão para a bacia.

Adicionamos os dados da bacia no modelo, iniciamos o processo de delimitação da bacia e os cálculos dos dados físicos relevantes, utilizando o MDEHC. Foi obtido através de imagens do banco de dados da *United States Geological Survey* (USGS), com resolução de 90m. Essa resolução foi escolhida em razão do tamanho da bacia e capacidade de processamento computacional disponível. A escala escolhida para essa bacia foi de 1/100.000, ou seja, com esse nível de detalhe os dados podem ser obtidos através das imagens SRTM de resolução de 30m ou 90m (GAD; ODALOVIĆ; ZAKY, 2018).

O mapa de uso e ocupação do solo foi determinado utilizando imagens *Landsat* com sensor OLI (*Operational Land Imager*). Realizamos a classificação supervisionada das imagens e as categorias principais encontradas foram: água, área urbana, pastagem, agricultura e floresta, conforme (ALMEIDA et al., 2018). O mapa de solos da bacia do Rio Teles Pires foi obtido através da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), juntamente com os dados de caracterização do solo para a elaboração das tabelas de entrada para o modelo (LOPES et al., 2020).

Após a inserção dos dados as Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU) foram geradas e, em seguida, as definições de tolerância para cada faixa de dado foram inseridas (10% para uso do solo, 10% para tipo de solo e 10% para a declividade, concluindo assim o processo de definição e delimitação das HRUs.

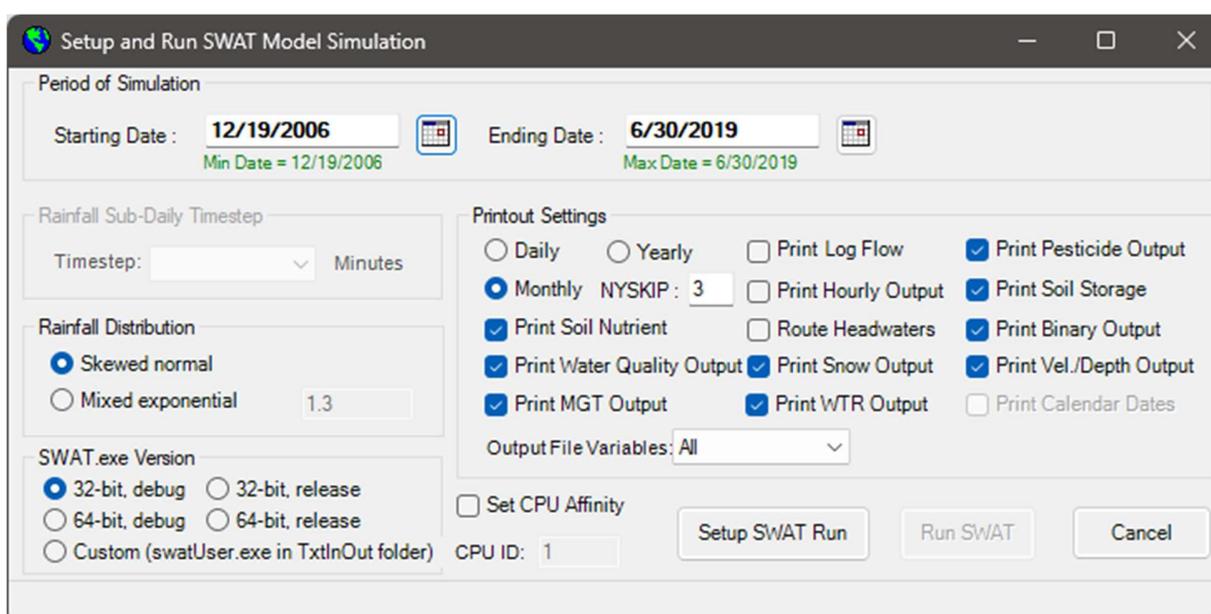
A etapa a seguir foi a introdução dos dados meteorológicos de 2006 a 2019. Os dados utilizados das estações locais foram: precipitação, umidade relativa e velocidade do vento dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de temperatura e radiação solar apresentavam muitas falhas e não puderam ser utilizados. Para contornar essa situação utilizamos o *Weather Generator Data* (WGen) do SWAT.

Para configurar o *WGen* foi necessário o uso de uma base de dados global para a correção e preenchimento de falhas dos dados meteorológicos. Essa base fornece dados em forma de malhas de pontos. O total de pontos contidos e utilizados na bacia foi de 34 pontos (para os dados de

temperatura e radiação solar), sendo a disponibilidade desses dados de 1979 a 2017. A base de dados global utilizada foi o *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). O CFSR é produto de reanálise de terceira geração, e um sistema de alta resolução com 64 níveis de dados.

Em seguida os atributos físicos dos solos foram acrescentados na base de dados do SWAT. Foi feita a associação dos valores com as novas classes de solo adicionadas ao modelo (Neossolo Quartzarênico Órtico (RQ), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVA), Cambissolo Háplico Argila de Atividade Baixa Distrófico (CX), Neossolo Flúvico Argila de Atividade Baixa Distrófico (RU) e Argilossolo Vermelho Distrófico (PV)).

Após a inserção dos dados as bases de dados do SWAT foram atualizadas. As tabelas de entrada foram geradas, e o modelo foi configurado para executar a primeira simulação (Figura 3).

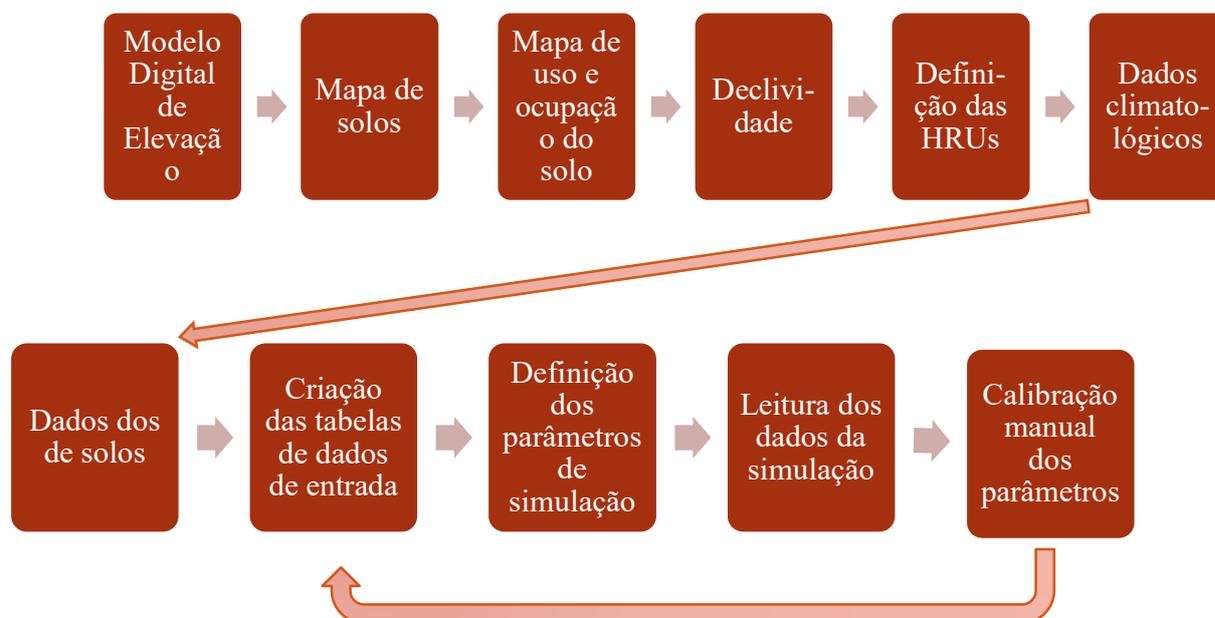


**Figura 3** - Parâmetros para a simulação no modelo SWAT.

O período para estabilização de vazão e aquecimento dos dados de entrada do programa foi estabelecido em 3 anos, que é o tempo usado para o calcular o nível de água do aquífero e outros parâmetros, (KULKARNI et al., 2022; GUUG; ABDUL-GANIYU; KASEI, 2020; SOOMRO et al., 2022). Foi feita configuração para resultar em dados mensais e para fornecer todos os dados disponíveis no resultado da simulação.

Por fim, os resultados foram calibrados de forma manual em relação ao parâmetro *Alpha*\_BF (fator de recessão da vazão de base) e ao fator de resposta à mudança na recarga do

aquífero. O valor inicial foi reajustado algumas vezes até a obtenção do melhor parâmetro ajustado (Figura 4).



**Figura 4** - Fluxograma de execução do modelo SWAT e a etapa de calibração manual.

### 4.3 Simulação no modelo MISDc

Para gerar a série de dados, foram calculados cinco parâmetros para o cálculo do SWB:  $W_{máx}$  (capacidade máxima de água no solo),  $K_s$  (condutividade hidráulica saturada),  $m$  (exponente de drenagem),  $Nu$  (proporção entre drenagem e infiltração) e  $b$  (fator de correção da evapotranspiração real). Para o cálculo do escoamento superficial apenas três parâmetros foram calculados:  $\gamma$  (tempo de atraso),  $\lambda$  (coeficiente de abstração inicial) e  $S_r$  (parâmetro de relação entre  $S$  e  $W(t)$ ) (MASSERONI et al., 2017). Assim, o modelo foi calibrado. Durante o processo de calibração, cada parâmetro pôde ter uma variação dos valores físicos (Tabela 1).

**Tabela 1** - Parâmetros utilizados no modelo MISDc, descrição e variação de cada parâmetro.

Componente do modelo	Parâmetro	Descrição	Unidade	Varição
SWB	Wmáx	capacidade máxima de água no solo	mm	100-1.000
	Ks	condutividade hidráulica saturada	mm h <sup>-1</sup>	0,01-20
	m	exponente de drenagem	*	05-60
	Nu	proporção entre drenagem e infiltração	*	0-1
	b	fator de correção da evapotranspiração real	*	0,4-2
RR	γ	tempo de atraso	*	0,5-6,5
	λ	coeficiente de abstração inicial	*	0,0001-0,2
	Sr	parâmetro de relação entre S e W(t)	*	01-04

**Fonte:** Adaptado de (BROCCA; MELONE; MORAMARCO, 2011).

O modelo foi calibrado utilizando dados de vazão no exutório da bacia do Alto Teles Pires, o período de calibração e validação foi de 2007 até 2018, sendo duas partes desse período (9 anos) usados na calibração e a outra parte para a validação (3 anos). A eficiência dos modelos foi avaliada através dos coeficientes de eficiência KGE (*Kling-Gupta Efficiency*), NSE (*Nash-Sutcliff Efficiency*) e Pbias (*Percentage BIAS*), (CAMICI et al., 2018). Para o cálculo dos coeficientes de eficiência utilizamos as equações (1), (2) e (3):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Qsim(t) - Qobs(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Qobs(t) - Qméd)^2} \quad (1)$$

Em que:  $Qsim$  é o valor da vazão simulada,  $Qobs$  é o valor da vazão observada e  $Qméd$  é o valor da média da vazão observada.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma sim}{\sigma obs} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu sim}{\mu obs} - 1\right)^2} \quad (2)$$

Em que:  $r$  é a correlação linear entre os valores observados e simulados,  $\sigma sim$  é o desvio padrão das vazões simuladas,  $\sigma obs$  é o desvio padrão das vazões observadas,  $\mu sim$  é a média das vazões simuladas e  $\mu obs$  é a média das vazões observadas. Os valores de referências usados levaram em consideração a eficiência mínima do modelo. Encontramos valores que foram comparados com o valor médio da bacia, que indicam desempenho mínimo do modelo. Como os valores obtidos pelo modelo são superiores aos valores encontrados, eles têm uma eficiência maior do que a vazão média na bacia.

$$Pbias = \left( \frac{\sum_{i=1}^i Si - Oi}{\sum_{i=1}^i Oi} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que:  $Si$  representa a vazão simulada e  $Oi$  representa a vazão observada. O Pbias é utilizado para avaliar o desempenho de modelos quantificando o erro sistemático ou viés. Valor de Pbias positivo indica que o modelo tende a superestimar os valores verdadeiros, enquanto o Pbias com valor negativo sugere subestimação. Quanto mais próximo de 0 (zero) estiver o valor de Pbias, melhor será o desempenho do modelo em termos de viés (Tabela 2).

Tabela 2 - Desempenho para estatísticas recomendadas para um intervalo de tempo mensal para NSE, KGE e Pbias (Moriasi et al, 2007).

	NSE	KGE	Pbias (%)
<b>Muito bom</b>	$1.00 \geq NSE > 0.75$	$1.00 \geq KGE > 0.75$	$\pm 10 \geq Pbias$
<b>Bom</b>	$0.75 \geq NSE > 0.65$	$0.75 \geq KGE > 0.65$	$\pm 15 \geq Pbias > \pm 10$
<b>Satisfatório</b>	$0.65 \geq NSE > 0.50$	$0.65 \geq KGE > 0.50$	$\pm 25 \geq Pbias > \pm 15$
<b>Insatisfatório</b>	$0.50 \geq NSE$	$0.50 \geq KGE$	$Pbias \geq \pm 25$

**Legenda:** NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*), KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) e Pbias (*Percentage BIAS*).

#### 4.4 Cenários de uso e ocupação do solo

Para os cenários de uso e ocupação do solo, alguns pontos em relação à bacia foram considerados. Primeiro a importância da região para o desenvolvimento agrícola da localidade; devido a esse aspecto o primeiro cenário de mudanças foi favorável à expansão dessa região da fronteira agrícola. Analisando as condições existentes na bacia notamos que, em determinadas sub-bacias, o valor de área ocupada por agricultura/pecuária era maior do que a área de floresta. Nesse caso as mudanças de cenário de ocupação foram em 3 proporções, 50%, 70% e 80% de mudança da área de floresta para área de agricultura (Tabela 3).

Tabela 3 - Descrição dos cenários propostos para as mudanças de uso e ocupação do solo na bacia.

Cenário	Descrição
A30F	Agricultura sendo substituída por Floresta em 30% da área total
A50F	Agricultura sendo substituída por Floresta em 50% da área total

A80F	Agricultura sendo substituída por Floresta em 80% da área total
F50A	Floresta sendo substituída por Agricultura em 50% da área total
F70A	Floresta sendo substituída por Agricultura em 70% da área total
F80A	Floresta sendo substituída por Agricultura em 80% da área total

Para o cenário mais conservador, consideramos o zoneamento em vigor da região determinado pela Lei 12.651/2012 referente ao novo Código Florestal. Este zoneamento enquadra o estado de Mato Grosso dentro da Amazônia Legal, estabelecendo alguns valores para o cumprimento de reserva legal, (Tabela 4).

**Tabela 4** - Áreas de reserva legal segundo a Lei 12.651/2012.

	Área de reserva legal
Áreas de floresta	80%
Área de cerrado	35%
Área de campos gerais	20%

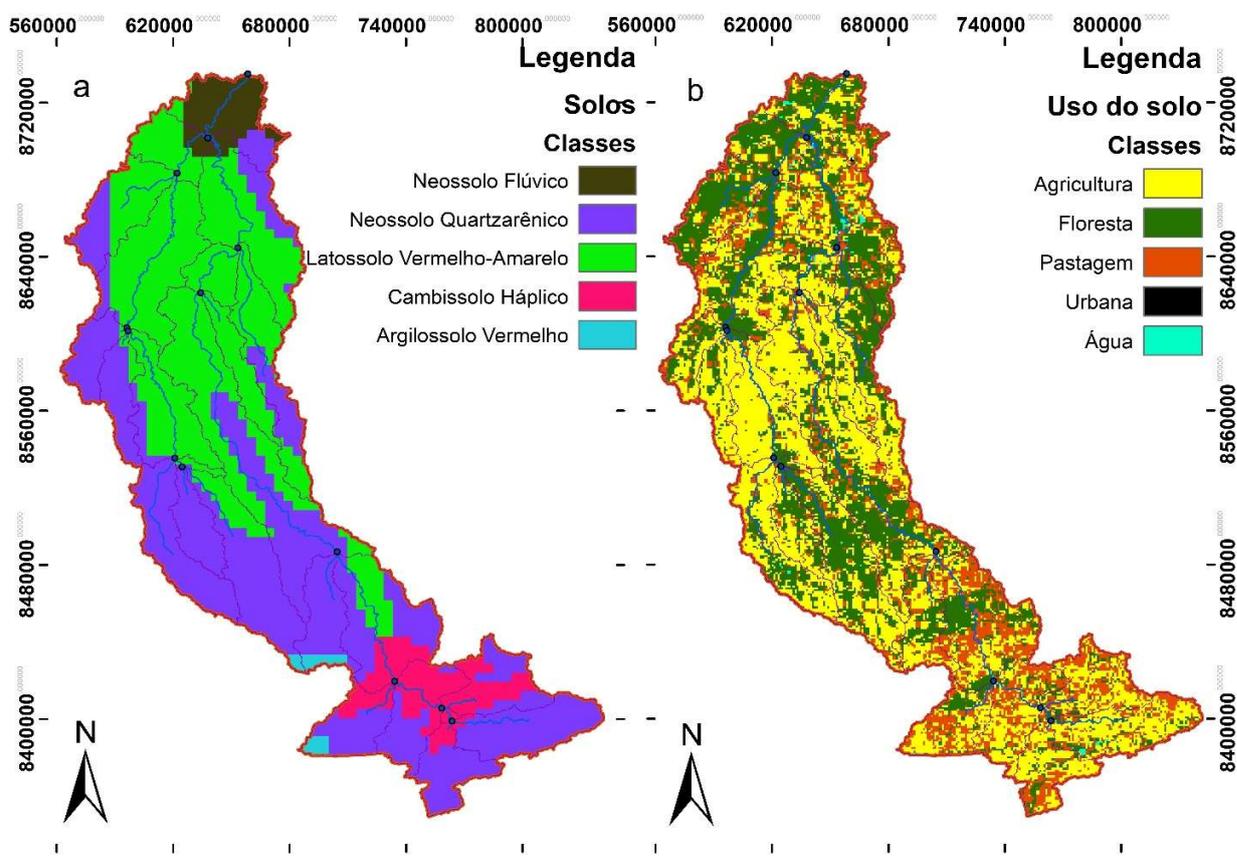
Com esses valores foram definidos cenários de uso e ocupação do solo visando ações mais conservadoras, substituindo áreas de agricultura e pastagem por floresta em 30%, 50% e 80%. Levamos em consideração a recuperação de áreas degradadas e de Área de Preservação Ambiental (APP), com a recomposição das árvores nativas da região. Com os mapas estabelecidos, as tabelas de entrada do SWAT foram atualizadas e as simulações para cada cenário novo (total de 6 cenários) foram realizadas e os dados de vazão tabelados.

## 5. Resultados

As classes de uso do solo obtidas para o modelo SWAT foram as seguintes: Agricultura (AGRL) 46,96%, Floresta (FRSE) 34,90%, Pastagem (PAST) 18,14%, Água (WATR) 0,50% e Área Urbana (URMD) 0,01%. As áreas de pastagem se concentram na parte a montante da bacia,

a agricultura está presente em toda a bacia, com concentração maior na parte central, e a área de floresta está presente no centro da bacia e a jusante, (Figura 5a).

Os tipos de solos encontrados na bacia foram: Neossolo Quartzarênico órtico 47,73%; Latossolo vermelho-amarelo distrófico 40,61 %; Cambissolo Háptico Argila de Atividade Baixa Distrófico 7,04%; Neossolo Flúvico Argila de Atividade Baixa Distrófico 4,01% e Argilossolo Vermelho Distrófico 0,61%. Os declives utilizados no modelo foram os intervalos de 0-5%, 5-10% e 10-9999% com valores de 58,41%, 33,98% e 7,61% da área total da bacia, (Figura 5b).

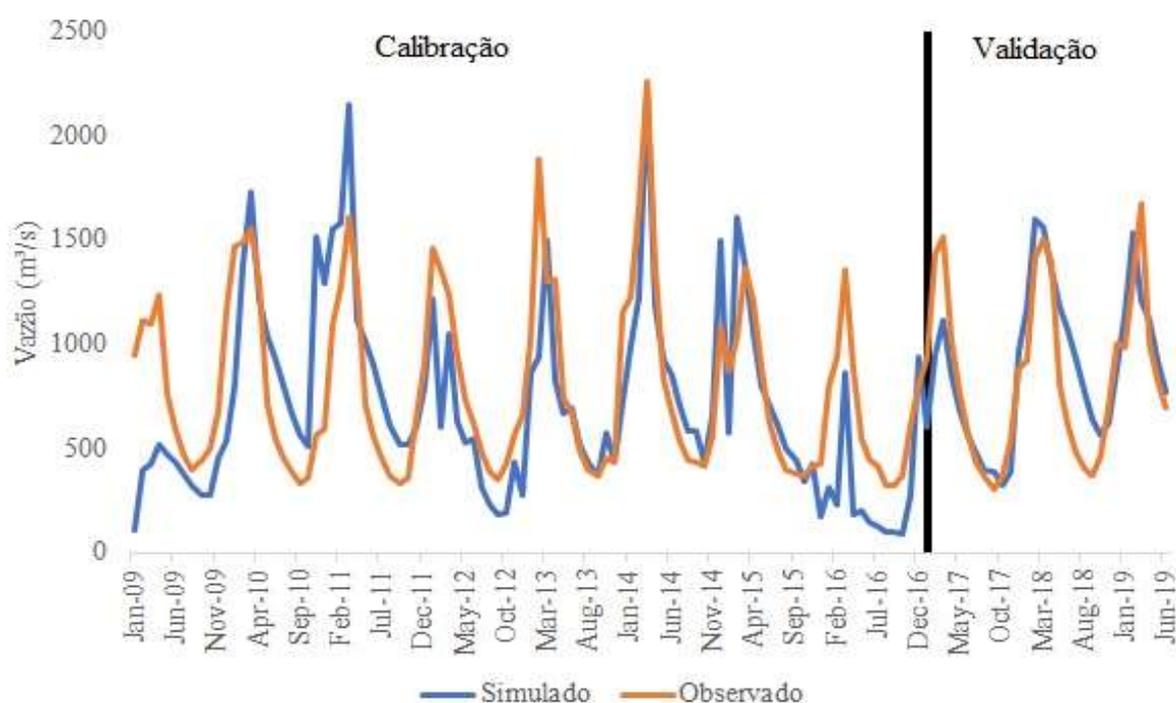


**Figura 5** - Mapa de solos da bacia do Alto Teles Pires (a) e Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Teles Pires (b).

Com os dados de entrada o modelo gerou 285 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), foram geradas 25 sub-bacias. A sub-bacia com maior presença de floresta foi a sub-bacia 8 com 81,43%, com maior presença de agricultura foi a sub-bacia 12 com 85,77% e a sub-bacia 19 teve

a maior presença de pastagem com 39,99%. A elevação na bacia varia entre 272 e 896 metros, com média sendo 421 metros.

Para obter as vazões com o modelo SWAT foi considerado o período para simulação entre janeiro de 2009 a junho de 2019, (Figura 6). Obtivemos, então, o resultado da simulação e, após esse resultado, realizamos a calibração manual do parâmetro mais sensível Alpha\_BF (Fator de recessão do escoamento de base), onde a vazão de base foi ajustada, (Figura 6).



**Figura 6** - Resultado da modelagem de vazão da bacia do Alto Teles Pires, usando o modelo SWAT, comparando os valores observados com os valores simulados e calibrados.

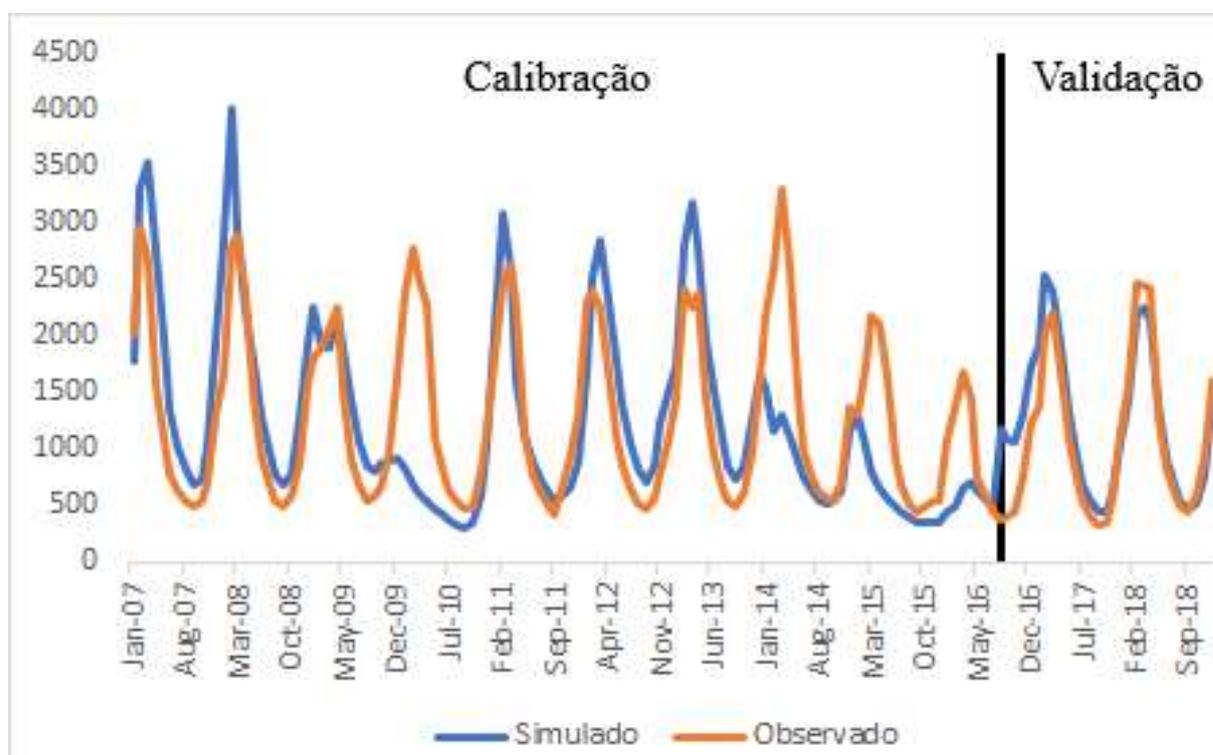
As vazões de base estavam ficando muito próximas de zero e as vazões de picos estavam sendo superdimensionadas. Com o ajuste do escoamento de base foi possível aumentar a vazão de base e reduzir as vazões de pico, obtendo assim curva mais próxima aos valores observados. Com os valores ajustados, calculamos as estatísticas da simulação para a calibração e validação depois da calibração manual do fator Alpha\_BF, (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores dos coeficientes NSE, KGE e Pbias antes e depois da calibração manual para o modelo SWAT.

	KGE	NSE	Pbias (%)
<b>Calibração</b>	0.70	0.36	7.03
<b>Validação</b>	0.79	0.63	-5.40

Legenda: NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*), KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) e Pbias (*Percentage Bias*).

Após a simulação do modelo SWAT iniciamos a simulação no modelo MISDc. Os dados de vazão obtidos com o modelo MISDc tiveram resultado satisfatório. O desempenho do modelo teve melhora considerável entre o período de calibração e validação (Figura 7).



**Figura 7** - Calibração e validação da simulação de vazão da bacia do Alto Teles Pires, usando o modelo MISDc.

O modelo apresentou os coeficientes conforme representados na Tabela 6. Os coeficientes da modelagem tiveram melhora durante o processo de validação (exceto o Pbias) e o modelo teve desempenho satisfatório ao longo dos testes feitos.

**Tabela 6** - Valores dos coeficientes estatísticos do modelo MISDc, calibrado e validado para a bacia.

	KGE	NSE	Pbias (%)
<b>Calibração</b>	0.66	0.28	3.73
<b>Validação</b>	0.81	0.75	-12.22

**Legenda:** KGE (Kling-Gupta Efficiency), NSE (*Nash-Sutcliff Efficiency*) e Pbias (*Percentage Bias*).

As mudanças de uso e ocupação do solo foram feitas com dados ajustados. Observamos mudanças na disponibilidade hídrica com a variação do uso e ocupação do solo, nas simulações da substituição da floresta por agricultura (Tabela 7).

**Tabela 7** - Vazões Q5, Q95 e Qmédia da bacia do Alto Teles Pires, para cada cenário de mudança de uso do solo com o avanço da fronteira agrícola.

	F50A	F70A	F80A
<b>Q5</b>	9,2%	12,3%	13,9%
<b>Q95</b>	8,8%	12,4%	14,2%
<b>QMédia</b>	6,1%	8,5%	9,7%

**Legenda:** F50A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 50%), F70A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 70%) e F80A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 80%).

As variações encontradas apresentam aumento na disponibilidade hídrica da bacia no volume médio ao longo do ano. A variação da Q5 foi de 9,2%, 12,3% e 14,0% para a substituição de 50%, 70% e 80%, respectivamente, da área de floresta existente por agricultura. A vazão média teve variação de 6,1% a 9,7%, enquanto as vazões Q95 tiveram acréscimo de 8,8% a 14,2%. Outros resultados utilizando o SWAT foram encontrados em outras bacias da região amazônica conforme (OLIVEIRA SERRÃO et al., 2021, LOPES et al. 2021 e ABE, 2018), que estudaram a mudança de uso e ocupação do solo e o impacto na disponibilidade hídrica na região amazônica e obtiveram resultados semelhantes na produção de água e balanço hídrico.

O segundo grupo de cenários foi o inverso, seguindo linha mais conservadora e de recuperação, a substituição da área de agricultura por floresta, (Tabela 8).

**Tabela 8** - Vazões Q5, Q95 e Qmédia da bacia do Alto Teles Pires, para cada cenário de mudança de uso do solo de forma conservadora.

	<b>A30F</b>	<b>A50F</b>	<b>A80F</b>
<b>Q5</b>	-7,6%	-12,3%	-19,5%
<b>Q95</b>	-13,6%	-28,2%	-47,4%
<b>QMédia</b>	-5,0%	-8,4%	-13,4%

**Legenda:** A30F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 30%), A50F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 50%) e A80F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 80%).

Nesse cenário, em que há diminuição da disponibilidade hídrica de acordo com a substituição da área agrícola por floresta, essa redução é de 5,0%, 8,4% e 13,4% para a substituição de 30%, 50% e 80% respectivamente para a vazão média mensal. As vazões Q5 tiveram redução que variaram de 7,6% a 19,5%, já as vazões Q95 tiveram redução de -5,0% a -13,4%.

Outros parâmetros que compõem o balanço hídrico, os quais foram calculados nas simulações, são: vazão de retorno (Qretorno), vazão lateral (Qlateral), vazão de superfície (Qsup), evapotranspiração (ET), percolação para o aquífero raso e recarga do aquífero profundo (Tabela 9).

**Tabela 9** - Valores das componentes de vazão e recargas de aquífero.

	<b>Simulado</b>	<b>A30F</b>	<b>A50F</b>	<b>A80F</b>	<b>F50A</b>	<b>F70A</b>	<b>F80A</b>
<b>Qretorno (mm)</b>	395.9	398.0	399.4	401.6	391.8	390.2	389.4
<b>Qlateral (mm)</b>	49.3	50.4	51.2	52.4	48.0	47.5	47.3
<b>Qsup (mm)</b>	204.7	168.4	144.2	107.8	249.8	267.8	276.9
<b>Qanual (mm)</b>	649.9	616.8	594.8	561.8	689.7	705.6	713.5
<b>ET (mm)</b>	909.4	942.9	965.2	998.7	869.1	853.0	845.0
<b>Percolação para o aquífero raso (mm)</b>	475.7	478.2	479.9	482.4	471.0	469.2	468.3
<b>Recarga do aquífero profundo (mm)</b>	23.8	23.9	24.0	24.1	23.6	23.5	23.4

**Legenda:** Simulado (valor encontrado pelo modelo após a calibração manual), A30F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 30%), A50F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 50%), A80F (Agricultura sendo substituída por Floresta em 80%), F50A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 50%), F70A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 70%) e F80A (Floresta sendo substituída por Agricultura em 80%).

A classe Floresta sendo substituída, em qualquer proporção, acarretará aumento da vazão, e de todas as suas componentes, em relação ao modelo simulado. Na análise dos componentes do balanço hídrico fica clara a tendência para o aumento na produção de água, ou aumento na vazão. Verificamos variações de acordo com a mudança de ocupação do solo, aumentando em média 10% na vazão, na época de seca a redução é de 9% e na época de chuva aumentando em até 40%.

Analisando os dados da segunda mudança de cenários, agricultura sendo substituída por floresta, os valores de vazão diminuem conforme a área de substituição aumenta, assim como todas as suas componentes, em relação ao modelo simulado. Podendo diminuir em 14% ao longo do ano, aumentar em 10% em períodos de chuva e reduzir em até 54% em épocas de seca.

Os dados de percolação para o aquífero raso e recarga de aquífero profundo foram os menos afetados pela mudança de uso e ocupação do solo. Houve diminuição em 1,50% para o caso de troca de Floresta por Agricultura e aumento em 1,40% para o cenário de recuperação de Agricultura por Floresta.

## **6. Discussão**

As mudanças de cenários de uso e ocupação do solo impactam na disponibilidade hídrica da bacia, diminuindo a vazão para o cenário conservador, recuperando áreas de agricultura e pecuário em floresta, e aumentando a vazão para o cenário de avanço da fronteira agrícola, transformando floresta em agricultura. A bacia hidrográfica do Rio Teles Pires desempenha papel importante para o desenvolvimento do estado de Mato Grosso. Possui também potencial para geração de energia hidrelétrica, com 6 usinas hidrelétricas com potencial total de geração de 3.600MW. A bacia possui um dos principais polos nacionais de irrigação por pivô central. Reconhecendo a importância do Rio Teles Pires, pesquisas se tornam cada vez mais necessárias para o gerenciamento e planejamento hídrico da região, assim como o monitoramento contínuo da região para a elaboração de estudos (BORELLA et al., 2022).

As mudanças de uso e ocupação do solo são conhecidas, mas os seus efeitos são muito complexos, quando os resultados são analisados de forma local podem surgir diferenças se os mesmos resultados forem analisados em uma escala mais continental. A relação intuitiva é que quanto mais árvores uma área possui, maior é a relação de retenção de água na bacia, logo existe o aumento da vazão de água em um rio. Mas essa relação está sendo colocada em discussão, estudos recentes mostram que o aumento de áreas de floresta causa a diminuição da vazão em escala média

anual (VAN MEERVELD et al., 2020). Isso quer dizer que temos que desmatar mais floresta e abrir novos campos de lavoura e pastagem? A resposta é não.

Se analisarmos os resultados da perspectiva apenas local, podemos chegar à conclusões precipitadas sobre a relação do uso e ocupação do solo e a disponibilidade hídrica na bacia, conforme os dados apontam (Ver Tabela 7 e 8), mas dados referentes as condições climáticas da região são surpreendentes, as florestas de forma geral são responsáveis em média por 40% da vazão de bacias hidrográficas, no caso da floresta Amazônica, ela é capaz de lançar na atmosfera através da evapotranspiração cerca de 70% da precipitação do Rio da Prata (VAN DER ENT et al., 2010), que fizeram um estudos em escala continental e encontraram a relação entre a evapotranspiração em bacias e a influência dessa umidade na precipitação em outras bacias.

Estes cenários de uso e ocupação servem para fomentar a tomada de decisão, auxiliando as políticas públicas de uso de solo e autorizações referentes ao uso de água na bacia. Por ter essa complexidade os dados precisam ser mais precisos e o mais detalhado possível, pensando de forma espacial dentro da bacia, para que as decisões sejam mais assertivas e direcionadas. É necessária rede de monitoramento mais efetiva, em relação a dados meteorológicos, fluviométricos e de produção de sedimentos para estudos futuros.

Nessas condições, o modelo SWAT apresentou desempenho satisfatório para a previsão de disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Teles Pires. Analisando os valores dos coeficientes encontrados no resultado da simulação, o NSE foi de 0,36 e 0,63 (calibração e validação). Ao analisarmos o coeficiente KGE, obtivemos os valores de 0,70 e 0,79 (calibração e validação), que leva em consideração três parâmetros diferentes, correlação linear, vies e variabilidade, e por fim o Pbias apresentou valores de 7,03% e -5,40% (calibração e validação). A escolha desses índices estatísticos para a avaliação do modelo levou em consideração que aparecem na maior parte dos estudos que envolvem modelos hidrológicos (AKOKO, et al., 2021).

A simulação realizada possibilitou análise mais detalhada da bacia, em relação à disponibilidade hídrica. Ainda assim, é o primeiro passo de um estudo mais complexo. Para usufruir do potencial máximo da ferramenta SWAT, este deve ser o primeiro estudo de uma série mais complexa. Com os dados de vazão calibrados, torna-se possível fazer os ajustes e calibrações no modelo para a próxima etapa que seria a calibração e validação do modelo para a produção de sedimentos na bacia.

Durante o processo de simulação do modelo SWAT os dados do MDEHC foram obtidos da USGS de forma simples e rápida. Os dados meteorológicos foram obtidos diretamente com o órgão responsável pelo monitoramento da bacia (INMET). Partes dos dados estão disponíveis na literatura, mas não para todos os solos ou para todos os parâmetros. Os parâmetros de solo que o SWAT necessita para simulação são: SNAM (classe de solo); NLAYERS (número de horizontes a serem considerados por classe de solo); HYDGRP (grupo hidrológico do solo (A, B, C e D)); SOL\_ZMX (profundidade máxima das raízes (mm)); SOL\_Z (profundidade de cada horizonte (mm)); SOL\_BD (densidade do solo (g/cm)); SOL\_AWC (capacidade de armazenamento de água do solo (mm/mm)); SOL\_K (condutividade hidráulica saturada (mm/h)); SOL\_CBN (conteúdo de carbono orgânico do solo (%)); CLAY (porcentagem de argila no solo (%)); SILT (porcentagem de silte no solo (%)); SAND (porcentagem de areia no solo (%)); ROCK (porcentagem de cascalho no solo (%)); USLE\_K (erodibilidade do solo (t.m<sup>2</sup>.hr/m<sup>3</sup>.t.cm)).

Na literatura foi possível encontrar alguns valores para cada solo, mas esses dados são de certa forma complexos, pois existem valores diferentes para cada camada. Dependendo do solo, pode haver de dois ou até mesmo quatro camadas com valores distintos. Na área da bacia em estudo foram encontrados cinco solos diferentes. Se o modelo fosse utilizado em toda a bacia do Rio Teles Pires o número de solos dobraria a quantidade, necessitando, assim, de pesquisas *in loco* para o levantamento desses valores. Considerando que a bacia possui mais de 140.000 km<sup>2</sup>, a obtenção desses dados é onerosa.

Resolvida essa situação dos dados de solos, os dados meteorológicos foram colocados no modelo. Dos dados disponíveis para o uso no modelo SWAT, apenas três valores, precipitação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, foram utilizados. Os outros dois valores (temperatura e radiação) tiveram que ser utilizados da base de dados global (CFSR). Ao levantar os dados foi possível confirmar que a bacia possui baixa densidade de estações de monitoramento. Nos mais de 36.000 km<sup>2</sup> da bacia, existem apenas três estações de monitoramento que foram utilizadas para o estudo. Essas estações possuíam em torno de 10% de falhas na série histórica de dados, precisando ser preenchidos os dados com o auxílio da base global. Essa correção pode afetar à acurácia do modelo. Se a densidade de estações de monitoramento fosse maior, as correções poderiam ser feitas de forma local e o desempenho do modelo poderia ser melhor.

Após esses dados serem colocados no modelo, a utilização da ferramenta é simples e intuitiva. O passo a passo para a execução do modelo e leitura pós-simulação é simples. Há uma

aba para cada parte da simulação, sendo elas: Setup, Hidrologia, Sedimento, Ciclo do Nitrogênio, Ciclo do Fósforo, Crescimento da Planta, Perdas de Nutrientes da Paisagem, Resumo do Uso do Solo, Processos no Curso de Água, Fontes Pontuais e Reservatórios.

No processo de calibração do modelo, neste trabalho, já executamos a primeira aba desse processo de resultados. As abas seguintes ficam como sugestão para trabalhos futuros, que, como continuidade desse trabalho, desenvolvam, como próximo passo, a calibração para o processo de produção de sedimentos na bacia. O modelo já apresenta resultados, mas ainda assim necessita de dados para podermos comparar e calibrar o modelo.

Finalizado esse processo de análise dos resultados, os dados foram calibrados manualmente para o valor mais sensível no modelo, seguindo a hierarquia para a calibração sugerida pelo desenvolvedor do modelo. Com os dados de vazão calibrados manualmente, o SWAT permite alterar a composição do uso e ocupação do solo para a simulação de mudanças nesta composição. Com essas variações de cenário, podemos observar que as mudanças de uso e ocupação do solo influenciam na disponibilidade hídrica na bacia. E, ainda, podemos quantificar essa variação na vazão de acordo com a intensidade de mudança no uso e ocupação do solo.

O cenário mais conservador vai de encontro com a Lei 12.651/2012, referente ao novo Código Florestal, que prevê como área de reserva legal, 80% para imóveis situados em áreas de florestas, 35% em imóveis situados em área de cerrado e 20% em imóveis situados em áreas de campos gerais. Tendo como ponto de importância, em épocas de seca, a vazão do rio pode reduzir em até 55%, dependendo da área recuperada por Floresta. Nesse ponto é crucial a análise dos tomadores de decisão. As diretrizes atuais, em relação à adequação da área para a recomposição da Reserva Legal das propriedades, como visto em Lopes et al 2021, do ano de 2006 a 2014 quase 10% de área desmatada foi recuperada como reserva legal. Esses valores diminuem a disponibilidade hídrica para o uso na produção energética e para outros usos.

Com a mudança do uso e ocupação do solo, ficou visível a importância de boas políticas públicas em relação ao uso do solo. Imaginando o cenário onde as áreas de agricultura e pastagem são substituídas por floresta, temos ganho na quantidade de água que fica retida na bacia, se transformando-se em vazão de retorno, ao mesmo tempo que aumenta a evapotranspiração. E no balanço hídrico final a vazão acaba diminuindo na maior parte do ano, podendo impactar na disponibilidade hídrica da bacia. Esse cenário de recuperação de áreas de floresta é possível em várias partes da bacia, visto que cinco das 25 HRUs têm mais de 60% de uso de solo a agricultura,

uma das 25 HRUs têm 80% de floresta, que é o valor referente da Reserva Legal para região de floresta, e 13 das 25 HRUs têm mais de 25% de floresta, valor referente à Reserva Legal para região de Cerrado. Isto posto, podemos observar que o uso do solo na bacia do Alto Teles Pires está no limite de uso. Caso esse cenário de recuperação de áreas para floresta seja mantido, teremos impacto na disponibilidade hídrica.

Pensando no cenário do avanço da fronteira agrícola, a tendência observada na disponibilidade hídrica é o aumento da quantidade de água na vazão. Pode favorecer, assim, o aumento da Q95, favorecendo a utilização de pivô central, sendo que a bacia possui um dos maiores polos dessa prática do Brasil, e aumenta a possibilidade de produção energética, durante os períodos de chuva. Por outro lado, durante os períodos de seca as vazões tendem a diminuir, podendo haver conflitos pelo uso da água, como visto em Robinet et al., 2018 e Salmona et al., 2023. Contudo, a análise sobre a produção de sedimentos é necessária. Se analisarmos os dados preliminares, já existentes no modelo, há aumento na produção de sedimentos na bacia, diante desse cenário de avanço da fronteira agrícola.

Essas diferenças de vazão podem ser justificadas pela variação do uso e ocupação do solo que teve impacto nas componentes da vazão (Tabela 9). As componentes de vazão de retorno (1,4% para o cenário A30F e -1,6% para o cenário F80A) e vazão lateral (6,4% para o cenário A30F e -4,0% para o cenário F80A) apresentaram menor variação em relação à mudança no uso e ocupação do solo. As maiores variações apresentadas foram da vazão superficial (-47% para o cenário A30F e 35,2% para o cenário F80A) e evapotranspiração (9,8% para o cenário A30F e -7,1% para o cenário F80A).

Essa substituição de Floresta por Agricultura impacta na dinâmica da água na bacia. Encontramos resultados semelhantes ao nosso estudo em áreas de pluviosidade de intensidade anual próxima à bacia do Rio Teles Pires. Os valores das componentes de vazão e evapotranspiração tiveram resposta parecida com a variação de uso e cobertura do solo (ENGIBA et al. 2021; ABUHAY, GASHAW e TSEGAYE, 2023), em áreas de urbanização acelerada, com a substituição de floresta por área urbana, obtiveram respostas das componentes de vazão com a mesma tendência (LIN et al. 2022).

Nesse outro cenário, com a substituição de floresta por agricultura, a água perde a capacidade de percolar e grande parte da precipitação vira escoamento superficial, devido à diminuição da área de interceptação e retenção de água na bacia, causada pelas árvores. A

proporção de vazão/precipitação aumenta e a proporção da vazão de base/vazão total diminui. Esses valores são inversamente proporcionais devido ao percurso da água, ou ela percola e vira vazão de base, ou escorre superficialmente e chega até o curso de água. Nesse cenário, o aumento do escoamento superficial causa o aumento na produção de sedimentos na bacia. Com o aumento na produção de sedimentos, a vida útil das UHEs diminui, necessitando de obras de manutenção mais frequentes, como a dragagem nos reservatórios. Isso torna essencial a continuação a partir deste estudo, para a simulação e calibração do modelo para a produção de sedimentos na bacia, o que favorecerá as decisões dos tomadores de decisão para o planejamento e gestão da bacia.

Estudos na região obtiveram resultados confirmando que a vazão do rio é sensível a mudança de uso e ocupação do solo. Abe et al. 2018 e Lopes et al. 2021 ao simularem a substituição de floresta por agricultura encontraram vazão maior na época de chuva e vazão menor na época de seca. Com esses resultados os estudos da região destacam a importância de um planejamento adequado para as diretrizes de uso e ocupação do solo da região. Esses valores de vazão levam a eventos mais extremos tanto na época de chuva, com eventos de enchentes, como na época de estiagem, com eventos de seca. Podemos observar que esses eventos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos em várias partes do País.

Com o modelo MISDc não foi possível realizar a análise de mudança de uso e ocupação do solo, devido à sua limitação do modelo, que trabalha com o conceito de modelo concentrado. Os dados de entrada são apenas precipitação e temperatura, sendo possível analisar apenas mudanças climatológicas futuras e outros cenários relacionados ao clima. O modelo MISDc apresentou resultado muito bom: coeficiente NSE de 0,75, KGE de 0,81 e Pbias -12,22).

A fácil aplicação do modelo MISDc, assim como outros modelos do tipo Chuva-Vazão (Instituto de Pesquisas Hidráulicas II (IPH II)), são indicados para estudos que necessitam apenas de valores de vazão. Calibrados e validados, esses modelos do tipo Chuva-Vazão têm a capacidade de fazer simulações para cenários climatológicos futuros com eficiência muito boa e com a vantagem de baixa exigência computacional. Considerando a baixa densidade de monitoramento na bacia, modelos do tipo Chuva-Vazão devem ser aplicados para a análise de vazão até que os modelos mais robustos, como o SWAT, entre outros, possam ser aplicados na bacia para análises mais detalhadas, ou também para estudos mais complexos de mudanças de uso e ocupação do solo e mudanças climáticas.

## 7. Conclusões

Constatamos no estudo que é possível o uso do SWAT para modelar bacia hidrográficas com dados restritos, obtendo desempenho satisfatório, em comparação com outros modelos hidrológicos concentrados, tendo como benefício as informações semidistribuídas do modelo SWAT.

O modelo MISDc apresenta desempenho melhor do que o modelo SWAT para os dados disponíveis. Sendo um modelo do tipo Chuva-Vazão, sua utilização é recomendada para estimativa de vazão e para análises de cenários futuros, visto que suas variáveis de entrada são apenas temperatura e precipitação.

As mudanças de cenários de uso e ocupação do solo impactam na disponibilidade hídrica da bacia, diminuindo a vazão para o cenário conservador, recuperando áreas de agricultura e pecuária em floresta, e aumentando a vazão para o cenário de avanço da fronteira agrícola, com transformação de floresta em agricultura ou pecuária. Esses valores foram obtidos analisando a bacia individualmente, como visto na literatura estudos relacionados a bacias que pertencem a região Amazônica devem ser estudados de forma mais continental para uma análise mais coerente em relação a umidade de água que passa de uma bacia para a outra, através das movimentações das massas de ar úmido.

Para os modelos serem mais acurados é necessário aumento dos dados de monitoramento disponíveis na bacia, tanto meteorológicos como dados de vazão. Com o modelo SWAT, que fornece informações semidistribuídas, é possível levantar mais informações para fomentar os tomadores de decisões, auxiliando a resolução de conflitos por interesses de todas as partes envolvidas.

As dificuldades encontradas foram a falta de melhor série histórica de dados meteorológicos, dados contínuos de vazão sem falhas e dados de características físicas do solo. Como sugestão para trabalhos fica o estudo de caracterização dos solos e suas propriedades físicas.

## 8. Referências

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 524, p. 733–752, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.

ABDULLAH, O.; DAKHLALLA, P. B. P. Assessing model parameters sensitivity and uncertainty of streamflow, sediment, and nutrient transport using SWAT. *Information processing in agriculture*, v. 6, p. 61–72, 2019.

ABE, C. A.; LOBO, F. D. L.; DIBIKE, Y. B.; COSTA, M. P. D. F.; DOS SANTOS, V.; NOVO, E. M. L. Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian basin. *Water*, 10(7), 932, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10070932>

ABUHAY, W.; GASHAW, T.; TSEGAYE, L. Assessing impacts of land use/land cover changes on the hydrology of Upper Gilgel Abbay watershed using the SWAT model. *Journal of Agriculture and Food Research*, v. 12, p. 100535, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - 2014: relatório síntese. Brasília: ANA, 2016. 33 p.

AKOKO, G.; LE, T. H.; GOMI, T.; KATO, T. A review of SWAT model application in Africa. *Water*, v. 13, n. 9, p. 1313, 2021.

ALMEIDA, Débora Natália de Oliveira; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel De; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra; BEZERRA, Ulisses Alencar; LEITE, Antonio Celso de Sousa. Uso e cobertura do solo utilizando geoprocessamento em municípios do Agreste de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, [S. l.], v. 04, p. 58–68, 2018.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, v. 17, p. 69-76, 2013.

AMORIM, J. S.; VIOLA, M. R.; JUNQUIERA, R.; OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R. Evaluation of satellite precipitation products for hydrological modeling in the brazilian cerrado biome. *Water*, v. 12, n. 9, p. 2571, 2020.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, v. 34, p. 73-89, 1998.

BAUWE, A.; ECKHARDT, K. U.; LENNARTZ, B. Predicting dissolved reactive phosphorus in tile-drained catchments using a modified SWAT model. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 19, n. 2, p. 198-209, 2019.

BHATTA, B.; SHRESTHA, S.; SHRESTHA, P. K.; TALCHABHADEL, R. Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin. *Catena*, v. 181, p. 104082, 2019.

BORELLA, D. R.; SOUZA, A. P.; ALMEIDA, F. T.; ABREU, D. C.; HOSHIDE, A. K.; CARVALHO, G. A.; PEREIRA, R. R.; SILVA, A. F. Dynamics of Sediment Transport in the Teles Pires River Basin in the Cerrado-Amazon, Brazil. *Sustainability*, v. 14, n. 23, p. 16050, 2022.

BROCCA, L.; LIERSCH, S.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; VOLK, M. Application of a model-based rainfall-runoff database as efficient tool for flood risk management. *Hydrology and Earth System Sciences*, [S. l.], v. 17, n. 8, p. 3159–3169, 2013. DOI: 10.5194/hess-17-3159-2013.

BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrological Processes*, [S. l.], v. 25, n. 18, p. 2801–2813, 2011. DOI: 10.1002/hyp.8042.

BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. Antecedent wetness conditions based on ERS scatterometer data. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 364, n. 1–2, p. 73–87, 2009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.10.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.10.007>.

CAMICI, S.; BROCCA, L.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Impact of Climate Change on Flood Frequency Using Different Climate Models and Downscaling Approaches. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S. l.], v. 19, n. 8, p. 04014002, 2014. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000959.

CAMICI, S.; CIABATTA, L.; MASSARI, C.; BROCCA, L. How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 563, p. 950–961, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.067. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.067>.

CARVALHO NETO, José Guimarães De; SRINIVASAN, Vajapeyam Srirangachar; RUFINO, Iana Alexandra Alvez. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do riacho dos namorados no Cariri Paraibano. *Revista Geográfica Acadêmica*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 48–58, 2011. Disponível em: [http://www.rga.ggf.br/index.php?journal=rga&page=article&op=view&path\[\]=166&path\[\]=109](http://www.rga.ggf.br/index.php?journal=rga&page=article&op=view&path[]=166&path[]=109).

CHEN, He; YANG, Dawen; HONG, Yang; GOURLEY, Jonathan J.; ZHANG, Yu. Hydrological data assimilation with the Ensemble Square-Root-Filter: Use of streamflow observations to update model states for real-time flash flood forecasting. *Advances in Water Resources*, [S. l.], v. 59, p. 209–220, 2013. DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.06.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.06.010>.

CHILKOTI, Vinod; BOLISSETTI, Tirupati; BALACHANDAR, Ram. Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, [S. l.], v. 109, p. 510–517, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.02.041. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>.

COHN, A. S.; BHATTARAI, N.; CAMPOLO, J.; CROMPTON, O.; DRALLE, D.; DUNCAN, J.; THOMPSON, S. Forest loss in Brazil increases maximum temperatures within 50 km. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 8, p. 084047, 2019.

DE OLIVEIRA SERRÃO, E. A.; SILVA, M. T.; FERREIRA, T. R.; DE ATAIDE, L. C. P.; DOS SANTOS, C. A.; DE LIMA, A. M. M.; DA SILVA, V. P. R.; DE SOUSA, F. A. S.; GOMES, D. J. C. Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield

determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research*, v. 37, n. 1, p. 54-69, 2022.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1001-1007, 2015

DOS R. PEREIRA, Donizete; MARTINEZ, Mauro A.; DA SILVA, Demetrius D.; PRUSKI, Fernando F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, [S. l.], v. 5, p. 149–163, 2016. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.11.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.008>.

DURÃES, M.F.; MELLO, C.R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. *Cerne*, v. 17, n. 4, p. 481-488, 2011.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Avaliação ambiental integrada da bacia hidrográfica do rio Teles Pires: relatório final – sumário executivo. 2009. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-248/topico-292/AAI%20Teles%20Pires%20-%20Relatório%20Final%20-%20Sumário%20Executivo\[1\].pdf#search=teles%20pires](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-248/topico-292/AAI%20Teles%20Pires%20-%20Relatório%20Final%20-%20Sumário%20Executivo[1].pdf#search=teles%20pires). Acesso: 06 de junho de 2023.

ENGIDA, T. G.; NIGUSSIE, T. A.; ANESEYEE, A. B.; BARNABAS, J. Land Use/Land Cover Change Impact on Hydrological Process in the Upper Baro Basin, Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2021, p. 1-15, 2021.

ENGBRETSEN, A.; VOGTA, R. D.; MARIANNE BECHMANN, B. SWAT model uncertainties and cumulative probability for decreased phosphorus loading by agricultural Best Management Practices. *Catena*, v. 175, p. 154-166, 2019.

ESQUIVEL-MUELBERT, A.; PHILLIPS, O. L.; BRIENEN, R. J. W.; FAUSET, S.; SULLIVAN, M. J. P.; BAKER, T. R.; CHAO, K. J.; FELDPASH, T. R.; GLOOR, E.; HIGUCHI, N.; LLOYD, J.; LIU, H.; MALHI, Y.; MARIMON, B.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MONTEAGUDO-MENDONZA, A.; POORTER, L.; SILVEIRA, M.; TORRE, E. V.; DÁVILA, E. A.; PASQUEL, J. A.; ALMEIDA, E.; LOAYZA, P. A.; GALBRAITH, D. Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. *Nature communications*, v. 11, n. 1, p. 5515, 2020.

FEARNSIDE, P. M.; Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. - Manaus: Editora do INPA, 2015.

FERNANDES, Josimar Gurgel; GALVINCIO, Josicleda Domiciano; FREIRE, Maria Betânia Galvão dos Santos. O modelo SWAT e suas possibilidades de aplicação em APL agrícolas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 115–126, 2012.

FRANCO, A. C. L.; OLIVEIRA, D. Y.; BONUMÁ, N. B. Comparison of single-site, multi-site and multi-variable SWAT calibration strategies. *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, n. 14, p. 2376-2389, 2020.

FUKUNAGA, Danilo Costa; CECÍLIO, Roberto Avelino; ZANETTI, Sidney Sára; OLIVEIRA, Laís Thomazini; CAIADO, Marco Aurélio Costa. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, [S. l.], v. 125, p. 206–213, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2014.10.032. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.032>.

GAD, Moamen A.; ODALOVIĆ, Oleg R.; ZAKY, Khaled M. Case study Accuracy assessment of SRTM 1,3 – arcsec by using topographic DEM over limited area of Egypt territory. [S. l.], v. 9, n. 8, p. 231–236, 2018.

GESUALDO, Gabriela Chiquito; OLIVEIRA, Paulo Tarso; RODRIGUES, Dulce Buchala Bicca; GUPTA, Hoshin Vijai. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, [S. l.], v. 23, n. 12, p. 4955–4968, 2019. DOI: 10.5194/hess-23-4955-2019.

GHAITH, Maysara; SIAM, Ahmad; LI, Zhong; EL-DAKHAKHNI, Wael. Hybrid Hydrological Data-Driven Approach for Daily Streamflow Forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 04019063, 2020. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001866.

GHORABA, Shima M. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal*, [S. l.], v. 54, n. 3, p. 583–594, 2015. DOI: 10.1016/j.aej.2015.05.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.018>.

GOMES, L. F. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VALENÇA, M. J. S. Modelo Baseado na Técnica de Redes Neurais para Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n. 1, p. 5-15, 2010.

GUUG, S. S.; ABDUL-GANIYU, S.; KASEI, R. A. Application of SWAT hydrological model for assessing water availability at the Sherigu catchment of Ghana and Southern Burkina Faso. *HydroResearch*, v. 3, p. 124-133, 2020.

HIMANSHU, S.K.; PANDEYA, A.; YADAV, B.; GUPTA, A. Evaluation of best management practices for sediment and nutrient loss control using SWAT model. *Soil & Tillage Research*, v. 192, p. 42-58, 2019.

Hurt, G.C., L. Chini. R. Sahajpal, S. Frolking, B.L. Bodirsky, K. Calvin, J.C. Doelman, J. Fisk, S. Fujimori, K.K. Goldewijk, T. Hasegawa, P. Havlik, A. Henimann, F. Humpnoder, J. Jungclaus, J. Kaplan, J. Kennedy, T. Kristzin, D. Lawrence, P. Lawrence, L. Ma, O. Mertz, J. Pongratz, A. Popp, B. Poulter, K. Riahi, E. Shevliakova, E. Stehfest, P. Thornton, F.N. Tubiello, D.P. Van Vuuren, and X. Zhang, 2020. Harmonization of Global Land-Use Change and Management for the Period 850-2100 (LUH2) for CMIP6. *GMD*, 13, 5425-5464, doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020.

KAVETSKI, Dmitri; FENICIA, Fabrizio; CLARK, Martyn P. Impact of temporal data resolution on parameter inference and model identification in conceptual hydrological modeling: Insights from an experimental catchment. *Water Resources Research*, [S. l.], v. 47, n. 5, p. 1–25, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009525.

KULKARNI, S.; ANURAG, T.; HUSSAIN, M.; PRASANNA, S. V. S. N. D. L.; HARI, V. Comparison of multi-objective and single objective calibration for SWAT model: a case study on Musi river basin, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, p. 1-8, 2022.

LATUF, M. de O. Modelagem hidrológica aplicada ao planejamento dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Acre. 2011. 240f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.

Lawrence, D.M., G.C. Hurtt, A. Arneeth, V. Brovkin, K.V. Calvin, A.D. Jones, C.D. Jones, P.J. Lawrence, N. de Noblet-Ducoudre, J. Pongratz, S.I. Seneviratne, and E. Shevliakova, 2016. The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: Rationale and experimental design. *GMD*, 9, doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016.

LIN, F.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, F. SWAT model-based quantification of the impact of land-use change on forest-regulated water flow. *Catena*, v. 211, p. 105975, 2022.

LINA, X.C.; BHUAXIA, Y.D.; YING, C.; MEIBING, L. L.; GAOA, A. J. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Bingqing Ecological Indicators*, v.58, p55–63, 2015.

LIU, R.; WANG, Q.; XU, F.; MEN, C, H.; GUO, L. Impacts of manure application on SWAT model outputs in the Xiangxi River watershed. *Journal of Hydrology*, v. 555, p. 479-488, 2018.

LOPES, T. R.; FOLEGATTI, M. V.; DUARTE, S. N.; ZOLIN, C. A.; FRAGA JUNIOR, L. S.; MOURA, L. B.; OLIVEIRA, R. K.; SANTOS, O. N. A. Hydrological modeling for the Piracicaba River basin to support water management and ecosystem services. *Journal of South American Earth Sciences*, [S. l.], v. 103, n. July, 2020. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102752.

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; DE ALMEIDA, F. T., DE SOUZA, A. P.; DE OLIVEIRA, R. F.; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. Hydrological regime, water availability and land use/land cover change impact on the water balance in a large agriculture basin in the Southern Brazilian Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103224, 2021.

LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Simulação do Transporte de Sedimentos, Nitrogênio e Fósforo na Bacia do Ribeirão Concórdia, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 39-54, 2013.

MASSARI, Christian; BROCCA, Luca; TARPANELLI, Angelica; MORAMARCO, Tommaso. Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoff modelling: A complex recipe? [s.l: s.n.]. v. 7, 2015. DOI: 10.3390/rs70911403.

MASSARI, Christian; CAMICI, Stefania; CIABATTA, Luca; BROCCA, Luca. Exploiting satellite-based surface soil moisture for flood forecasting in the Mediterranean area: State update versus rainfall correction. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 10, n. 2, 2018. DOI: 10.3390/rs10020292.

MASSERONI, Daniele; CISLAGHI, Alessio; CAMICI, Stefania; MASSARI, Christian; BROCCA, Luca. A reliable rainfall-runoff model for flood forecasting: Review and application to

a semi-urbanized watershed at high flood risk in Italy. *Hydrology Research*, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 726–740, 2017. DOI: 10.2166/nh.2016.037.

MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; PINTO, L. C.; BESKOW, S.; CURI, N. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 1, p. 7-25, 2016.

MELO NETO, J.O.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT RBRH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n.1, p. 177-188, 2014.

MOORE, R. J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 273–297, 1985. DOI: 10.1080/02626668509490989.

Moraes, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 98, p. 257-277, 1999.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 494p, 2005.

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. *PloS one*, v. 12, n. 6, p. e0179414, 2017.

PEREIRA, D. R.; ALMEIDA, A. Q.; MARTINEZ, M. A.; ROSA, D. R. Q. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian east coast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, n.4, p.1350-1358, 2014.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 5, n. 1, p. 149-163, 2016.

PINTO, D.B.F.; SILVA, A.M.; BESKOW, S.; MELLO, C.R. COELHO, G. Application of the soil and water assessment tool (SWAT) for sediment transport simulation at a headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. *Transactions of the ASABE*, v.56, n.2, p697-709, 2013.

QUAN, Zhongxian; TENG, Jianbiao; SUN, Wenchao; CHENG, Tao; ZHANG, Jie. Evaluation of the HYMOD model for rainfall-runoff simulation using the GLUE method. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, [S. l.], v. 368, n. 51579007, p. 180–185, 2015. DOI: 10.5194/piahs-368-180-2015.

ROBINET, J.; MINELLA, J. P. G.; BARROS, C. A. P.; SCHLESNER, A.; LUCKE, A.; AMEJEIRAS-MARIÑO, Y.; OPFERGELT, S.; VANDERBORGHT, J.; GOVERS, G. Impacts of forest conversion and agriculture practices on water pathways in Southern Brazil. *Hydrological Processes*, v. 32, n. 15, p. 2304-2317, 2018.

RODRIGUES, Evandro L.; ELMIRO, Marcos A. T.; BRAGA, Francisco de A.; JACOBI, Claudia M.; ROSSI, Rafael D. Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 70–76, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p70-76.

RODRIGUES, A. A.; MACEDO, M. N.; SILVÉRIO, D. V.; MARACAHIPES, L.; COE, M. T.; BRANDO, P. M.; SHIMBO, J. Z.; RAJÃO, R.; SOARES-FILHO, B.; BUSTAMANTE, M. M. C. Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. *Global Change Biology*, v. 28, n. 22, p. 6807-6822, 2022.

SALMONA, Y. B.; MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; SILVA, J. F. A.; COELHO FILHO, O. A.; PEDLOWSKI, M. A.; SAMPAIO, J. M.; CASTRILLÓN, L. C. R.; BRANDÃO, R. A.; SILVA, A. L.; SOUZA, S. A. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustainability*, v. 15, n. 5, p. 4251, 2023.

SEPLAN - Secretaria de Estado de Planejamento de Mato Grosso, 2017. Disponível em: <http://www.seplan.mt.gov.br/-/3934855-pib-mato-grosso-e-municipios>.

SEPLAN - Secretaria de Estado de Planejamento de Mato Grosso, Revisão do ZSEE-MT (Zoneamento Socioeconômico-ecológico de Mato Grosso), 2018.

SOOMRO, S.; HU, C.; BOOTA, M. W.; AHMED, Z.; CHENGSHUAI, L.; ZHENYUE, H.; XIANG, L.; SOOMRO, M. H. A. A. River flood susceptibility and basin maturity analyzed using a coupled approach of geo-morphometric parameters and SWAT model. *Water Resources Management*, v. 36, n. 7, p. 2131-2160, 2022.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. *Nativa*, Sinop, v. 01, n. 01, p.34-43, out./dez., 2013.

SOUZA, V. A. S. Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc\\_download/2598-vinicius-alexandre-sikora-de-souza?Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/doc_download/2598-vinicius-alexandre-sikora-de-souza?Itemid=)>. Acesso em: 3 jul. 2019.

THEODORO, S.H. Conflitos e uso sustentável dos recursos naturais. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.

TORRELLA-RAVENTOS, M.; FELDPAUSH, T. R.; VEENENDAAL, E.; SCHRODT, F.; SAIZ, G.; DOMINGUES, T. F. On the delineation of tropical vegetation types with an emphasis on forest/savanna transitions. *Plant Ecology & Diversity*, v. 6, n. 1, p. 101-137, 2013.

VAN MEERVELD, H. J.; JONES, J. P. G.; GHIMIRE, C. P.; ZWARTENDIJK, B. W.; LAHITIANA, J.; RAVELONA, M.; MULLIGAN, M.; Forest regeneration can positively contribute to local hydrological ecosystem services: Implications for forest landscape restoration. **Journal of Applied Ecology**, v. 58, n. 4, p. 755-765, 2021.

VAN DER ENT, R. J.; SAVENIJE, H. H. G.; SCHAEFLI, B.; STEELE-DUNNE, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. **Water Resources Research**, v. 46, n. 9, 2010.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JUNIOR, F. W. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

XU, C. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Journal Agricultural and Forest Meteorology*, p.98-99, p. 295-304, 1999.

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R.; PAULINO, J. Mudança do uso e cobertura do solo na zona de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado: Estudo de caso da bacia do alto Rio Teles Pires. *Acta Amazonica*, v. 48, p. 168-177, 2018.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using genetic algorithms and Bayesian model averaging. *Journal of Hydrology*, v. 374, n., p. 307-317, 2009.