



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**ANÁLISE DO USO, COBERTURA DA TERRA E GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO COM BASE NO MODELO HIDROLÓGICO SOIL
AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) COM PAISAGEM
CÁRSTICA NO ALTO DA BACIA DO RIO CORRENTE(GO)**

LUDMAGNA PEREIRA DE ARAÚJO

**BRASÍLIA-DF
2022**

LUDMAGNA PEREIRA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DO USO, COBERTURA DA TERRA E GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO COM BASE NO MODELO HIDROLÓGICO SOIL
AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) COM PAISAGEM
CÁRSTICA NO ALTO DA BACIA DO RIO CORRENTE(GO)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Linha de pesquisa: Análise de Sistema Naturais.

Eixo Temático: Gestão Ambiental e Territorial.

Orientador: Prof.^a Dra. Ruth Elias de Paula Laranja

Co-orientador: Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto

**Brasília-DF
2022**

AA663a Araújo, Ludmagna Pereira de
Análise do uso, cobertura da terra e geração
de escoamento com base no modelo hidrológico soil
and water assessment tool (SWAT) com paisagem
cárstica no alto da bacia do Rio Corrente(GO) /
Ludmagna Pereira de Araújo, orientador Ruth Elias
de Paula Laranja; co-orientador Michael
Vandesteem Silva Souto. -- Brasília, 2022.

108 p.

Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de
Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, 2022.

1. Balanço Hídrico. 2. Índice Topográfico. 3.
Sensoriamento Remoto. 4. Análise Estatística. 5.
Impacto Ambiental. I. Laranja, Ruth Elias de Paula,
orient. II. Souto, Michael Vandesteem Silva, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pela autora da
pesquisa

É concedida à Universidade de Brasília (UnB) à permissão para reproduzir cópias desta tese e
emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora
reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser
reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Ludmagna Pereira de Araújo

LUDMAGNA PEREIRA DE ARAÚJO

**ANÁLISE DO USO, COBERTURA DA TERRA E GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO COM BASE NO MODELO HIDROLÓGICO SOIL
AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) COM PAISAGEM
CÁRSTICA NO ALTO DA BACIA DO RIO CORRENTE(GO)**

Comissão examinadora para Defesa da Tese como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Geografia, pelo Programa de Pós Graduação em Geografia (PPGGEA), da Universidade de Brasília, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, opção Acadêmica.

Brasília-DF, 01 de dezembro de 2022

Prof.^a Dr.^a.Helen da Costa Gurgel
(Coordenador PPGGEA - UnB)

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Ruth Elias de Paula Laranja (UnB)
Departamento de Geografia
(Orientadora)

Prof. Dr. Michael Vandesteem Silva Souto
(UFCE/UFRN) Departamento de Geologia
(Coorientador)

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (UFRN)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
(Examinador Externo)

Prof.^a Dr.^a Ioneide Alves de Souza (UFRPE)
Departamento de Tecnologia Rural
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Rafael Rodrigues da Franca (UnB),
Departamento de Geografia
(Examinador Interno)

Prof.^a Dr.^a Roselir de Oliveira Nascimento
(UnB), Departamento de Geografia
(Suplente)

À filha (Sarah) unívoco à vida em abundância, à meus pais pelo incentivo e aos meus amigos que estiveram comigo nessa jornada, compreendendo a condição, me abstendo de ficar ausente.

AGRADECIMENTOS

Durante a jornada de realização deste trabalho, não faltaram pessoas para agradecer, que contribuíram diretamente para o meu crescimento científico e pessoal. Consegui o apoio de várias pessoas e quis agradecer a vocês que fazem parte da minha estória.

Ao nobre Dr. Michael Vandesteen Silva Souto pela força e entusiasmo, por ter me aceitado quando estava prestes a desistir devido à distância da comunidade acadêmica e isolamento pandêmico (COVID-19), foi um período que necessitou de muitos ajustes e adaptação. À maravilhosíssima Dra. Ruth Elias de Paula Laranja pela força, atenção, presteza e compreensão. Ao ilustríssimo professor Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes por todo o apoio nesta empreitada, pela paciência e não menos, pelos tantos conhecimentos científicos compartilhados quanto pelos conselhos que levarei para a vida.

Meus sinceros agradecimentos pela contribuição dos professores que fizeram parte da banca examinadora, os Drs. Rafael, Ioneide, Venerando e Roselir. Minha gratidão ainda, ao Dr. Anildo pela leitura rigorosa e coerência textual que a pesquisa exige.

Afagarei meu infindável reconhecimento aos professores Drs. da UnB que tive o prazer de conhecer, vocês são incríveis no compartilhamento de suas ciências, em especial os docentes Drs. Dante Flávio, Fernando Sobrinho, Osmar Abílio, Renato Fontes e Rogério Uagoda. A todos os colegas do Departamento de Geografia, em especial ao acolhimento da Coordenação e Secretaria do PPGGEA/UnB que foram essenciais para manter a dedicação neste trabalho, em especial ao Dr. Valdir Steinke pelo zelo e direção, aos nobres Agnelo Camelo e Jorge Luiz pela preciosa atenção a mim dispensada, carinho e amizade. À Universidade de Brasília e pelo apoio incondicional.

Aos professores Drs. da UFRN, que nunca desistiram de mim, Drs. Reinaldo Petta, Heitor Maia, Brás Diniz, Ricardo Amaral, Zorano, Raquel Franco e Marcela (do Departamento de Geologia/UFRN). EMBRAPA/RN, Nelson; EMBRAPA/PE, Flávia Milene; Da Geografia/UFRN, Drs. Orgival, Cleonice Furtado, Luiz Martins, Elias Nunes, Fernando Moreira, Marcelo Chaves e MSc. Ana Cláudia. De Geografia/UERN, Dr. Franklin e MSc. Wendson. Do IFRN, na Geografia, Dra. Ana Mônica, Erivaldo, Vera Lúcia e da Engenharia Dra. Josyanne Giesta. E ainda aos Drs. Evanimeck, Cristian Mauricio Montecinos, Franklin Mendes, Paula Stein, Tamires, Teresa, Vânia Figueiredo e Petronilo; MSc. Arnóbio, Segundo, Arimatéia Cunha e Paulo Ivo. Aos contemporâneos Marcelo Bezerra, Magno, Daniel Vitor, Joaquim das Virgens, Vêzinha, Cris, Juliana, Dani, Pavla e Claudinha pelo companheirismo.

Especialmente aos amigos que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização desta tese: Adílio, Bruno, Celi, Geruza, Gildevar, Janaína, Gracy, Lílian, Luciana, Sandra, Marcelo Henrique, Magiver, Maria José, Mirinha, Noeme, Rosário e Simone muito obrigado por tudo!

A minha eterna gratidão ao Dr. Jonathan Motta, por disponibilizar seu raríssimo tempo na introdução prática ao SWAT, em uma época que tive que fazer a tese toda em Natal, distante da UnB, de um assunto totalmente inédito, o Sr. me fez o SWAT ser possível.

Ao Dr. Righetto "in memoriam" e esposa (Magaly Righetto) pela amizade e apoio na questão da modelagem hidrológica, me iluminando e instruindo nas infinitas possibilidades a seguir. Foi uma honra, um privilégio conhecer uma pessoa tão culta e nobre, um verdadeiro gentleman, cheio de projetos e tantos sonhos ainda a realizar.

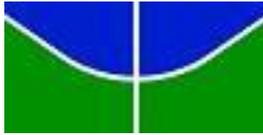
No âmbito institucional, sou grata aos doutores e mestres que tive trocas de experiências e a oportunidade de encontrar-me profundamente, aos colegas MSc. Raina Ferreira, Vanessa, Wilson e Maria Rita do Grupo de Pesquisa da Geografia Física da UnB e a todos os amigos conquistados no Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), em especial ao Matheus, de Geomática e de Hidrogeologia (LAHIDROGEO) da UFRN pelo qual merecem um agradecimento especial e mesmo já estando distante de alguns, não os esquecerei jamais!

Com igual importância, amplio minha gratidão ao Exército Brasileiro, instituição que me deu apoio, na pessoa dos Generais Lauro, César, Eschiletti, Brandão; Coronéis Falcão, Rômulo, Franklin e aos colegas de trabalho do DEC (DPIMA/DOM). Do apoio dos colegas de trabalho da CAERN, Ildefonso, Marcelo e João. Da SEMARH/IGARN, em especial a Auricélio, Gláucia, Marlise, André Nunes, Giovana, André Viana e esposa. À Aeronáutica Brasileira, na pessoa de Capitão César, Sgto Jucélia, SO Reginaldo, Antônia, a turma da topografia e do asfalto. E aos colegas da Escola Estadual Maria Queiroz (MAQ/RN).

Com extrema gratidão, externo à minha família pela compreensão, a quem recorro nas minhas angústias. Em Brasília, pelo apoio e guarida, aos primos Marcelo, Francisco, Jucélio, Neves e família; A tio Nego e Fátima, tio Vito, tia Olívia, primos Vilmarques, Magna, Viviane e família. No RN, tia Marta, Rubinha, Jaque, Rousinha e família; Tia Edite, Raivel e família. Tio Hostenildo, Larissa, Luana e família. Apesar das muitas dificuldades, nos mantemos unidos contra as adversidades! Pai te amo, mãe que Deus lhe dê muita saúde e muitos anos de vida aos dois! Ao único e exclusivo irmão muito grata pelo apoio.

“In memoriam” a minha querida avó Maria, coluna master que me fortaleceu com suas lições; Vó Mariana, meus queridos tio Altivo, tia Ericina, tio Jessé e Catarina, tia Rita e primo Éder que partiram enquanto construía esta tese (vos amo).

À Deus que esteve sempre comigo e por me conceder força nos momentos em que pensei em desistir. Enfim, sou eternamente grata a todos vocês!



RESUMO

ANÁLISE DO USO, COBERTURA DA TERRA E GERAÇÃO DE ESCOAMENTO COM BASE NO MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) COM PAISAGEM CÁRSTICA NO ALTO DA BACIA DO RIO CORRENTE(GO)

Entender como a hidrologia é influenciada pelas alterações do uso da terra, tem sido muito discutido ao longo dos anos no que tange a predição dos efeitos de mudanças em pequenas bacias experimentais. Com base nessa premissa e, por meio de simulações, este trabalho avaliou a aplicabilidade do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para investigar sua confiabilidade e analisar o impacto das mudanças de Uso da Terra/Cobertura do Solo (LULC) sobre a hidrologia durante o período de 1985 e 2019 na porção alta da Bacia do Rio Corrente (ABRC). O padrão espacial do Escoamento Superficial (SURq), de Subsuperfície (GWq) e Evapotranspiração (ET) foram quantificados em trinta e cinco (35) subbacias, assim como correlacionando positivamente tais componentes hidrológicos com mudanças do LULC em altos níveis de confiança. As distinções geomorfológicas de infiltração rápida pelas fraturas das rochas calcárias, aliado a distribuição de áreas antrópicas sob a cobertura vegetal têm efeitos notáveis *e.g.*, no *runoff* superficial, como é o caso das terras agrícolas, de pecuárias, urbanas e; no *runoff* de subsuperfície e das terras de florestas. Os resultados encontrados para a bacia permitiram concluir que: 1) a diferença espacial era óbvia na cota entre 740 a 900mm onde o gradiente era de 59%, um SURq médio na ordem de 140mm no período simulado de 2019 e 300mm no período de 1985. 2) a bacia apresentou um rico GWq, cerca de 2 a 3 vezes que o SURq. Essas diferenças são características em relevos com feição cárstica. As características de distribuição da vegetação em áreas antropizadas têm efeitos minimizadores no GWq, como é o caso das terras agrícolas, de pasto e urbanas e maximizadoras nas terras vegetadas (florestas); 3) que houve aumento do SURq em terras destinadas ao pasto, cerca de 11% e a diminuição de terras agrícolas e de florestas, cerca de 7% cada, foi o principal fator de um impacto negativo na bacia, pois reequilibra outros processos hidrológicos. 4) como o terreno é um fator significativo que contribui para o efeito do controle macroscópico de funcionamento da geração do escoamento, o escoamento superficial total e o GWq aumentaram significativamente com elevação e inclinação crescentes e; 5) que houve diferenças espaciais entre a área de formação savânica a montante da bacia e a cultura canavieira a jusante, na área de descarga, por sua vez o SURq apresentou um ponto de viragem devido à influência da vegetação. O estudo permitiu concluir ainda que o volume do *runoff* de subsuperfície médio simulado é maior na região da Área de Proteção Ambiental (APA) das Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) e, o *runoff* superficial é superior no Sudeste e menor no Nordeste da bacia. A ABRC carece de um gerenciamento intensivo nas áreas com feição cárstica com uma política intensiva de boas práticas de manejo. Desta forma, pode-se afirmar que o estudo fornecerá uma base teórica para bacia e na região cárstica. A abordagem proposta é consistente com os efeitos observados na bacia a partir dos resultados encontrados na literatura internacional em diferentes regiões do mundo sob restauração e reconstrução ecológica.

PALAVRAS-CHAVE: Balanço Hídrico. Impacto Ambiental. Sensoriamento Remoto. Análise Estatística. Índice Topográfico.

ABSTRACT

ANALYSIS OF USE, LAND COVERAGE AND RUNNER GENERATION BASED ON THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) HYDROLOGICAL MODEL WITH KARST LANDSCAPE AT THE TOP OF THE CORRENTE RIVER BASIN (GO)

Understanding how hydrology is influenced by changes in land use has been much discussed over the years with regard to predicting the effects of changes in small experimental basins. Based on this premise and through simulations, this work evaluated the applicability of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model to investigate its reliability and analyze the impact of Land Use/Land Cover Changes (LULC) on hydrology during the period 1985 and 2019 in the upper portion of the Rio Corrente Basin (ABRC). The spatial pattern of Surface Runoff (SURq), Subsurface Runoff (GWq) and Evapotranspiration (ET) were quantified in thirty-five (35) sub-basins, as well as positively correlating such hydrological components with LULC changes at high confidence levels. The geomorphological distinctions of rapid infiltration by fractures of limestone rocks, combined with the distribution of anthropic areas under the vegetation cover have effects notable e.g., in surface runoff, as is the case of agricultural, livestock, urban land and; in subsurface and forestland runoff. The results found for the basin allowed us to conclude that: 1) the spatial difference was obvious in the elevation between 740 and 900mm where the gradient was 59%, an average SURq in the order of 140mm in the simulated period of 2019 and 300mm in the period from 1985; 2) the basin presented a rich GWq, about 2 to 3 times the SURq. These differences are characteristic in reliefs with a karst feature. Vegetation distribution characteristics in anthropized areas have minimizing effects on GWq, as is the case of agricultural, pasture and urban lands, and maximizing effects on vegetated lands (forests); 3) that there was an increase in the SURq on land used for pasture, around 11% and the decrease in agricultural land and forests, around 7% each, was the main factor of a negative impact on the basin, as it rebalances other hydrological processes; 4) how the terrain is a significant factor contributing to the effect of the macroscopic control of functioning of the total runoff generation and the GWq increased significantly with increasing elevation and slope and; 5) that there were spatial differences between the area of savanna formation upstream of the basin and the sugarcane culture downstream, in the discharge area, in turn, the SURq presented a turning point due to the influence of vegetation. The study also allowed us to conclude that the simulated average subsurface runoff volume is higher in the Environmental Protection Area (APA) of Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) region, and the surface runoff is higher in the Southeast and lower in the Northeast of the basin. The ABRC lacks intensive management in areas with karstic features with an intensive policy of good management practices. In this way, it can be stated that the study will provide a theoretical basis for the basin and the karst region. The proposed approach is consistent with the effects observed in the basin from the results found in the international literature in different regions of the world under ecological restoration and reconstruction.

KEYWORDS: Hydric Balance. Environmental Impact. Remote Sensing. Statistical Analysis. Topographical Index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Percentual dos principais países segundo registros da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019).....	25
Figura 2.2 Autor/ano por número de citações/ano conforme registros da CAPES (BRASIL, 2019).....	26
Figura 3.1 Diagrama da Estrutura Organizacional da Tese	38
Figura 3.2 Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.....	40
Figura 3.3 Etapas na aplicação do SWAT inclusive na porção do relevo cárstico	43
Figura 3.4 Roteiro metodológico simplificado das etapas da pesquisa.....	44
Figura 3.5 Passos no SWAT para concepção do comportamento hidrológico da ABRC.....	45
Figura 3.6 Arcabouço conceitual das rotinas executadas no ArcSWAT	46
Figura 4.1 Estrutura organizacional dos resultados da pesquisa	50
Figura 4.2 Localização do trecho superior da bacia do Rio Corrente, da área de estudo, com altimetria e exultórios	56
Figura 4.3 Classificação dos Solos e Unidades Geológicas na ABRC	56
Figura 4.4 Classificação do LULC (1985) e LULC (2019)	57
Figura 4.5 Roteiro metodológico da geração dos produtos a) MapBiomias; b) da ABRC até a saída no modelo.....	59
Figura 4.6 Diagrama da preparação e manuseio das imagens no modelo e da ABRC	60
Figura 4.7 Comparação do fluxo mensal durante o período de calibração e verificação do modelo	64
Figura 4.8 Mudança sensata da precipitação simulado por subbacia.....	66
Figura 4.9 Mudança sensata da evapotranspiração simulado por subbacia	67
Figura 4.10 Localização da área estudada.....	72
Figura 4.11 Fluxograma para análise dos impactos de mudança de LULC sob a hidrologia cárstica	73
Figura 4.12 Mapa de LULC, período de 1985	74
Figura 4.13 Mapa de LULC, período de 2019	75
Figura 4.14 Amostras comparativas dos Autores, BRASIL (2015) e MapBiomias (2022).....	76
Figura 4.15 Fluxograma das etapas de modelagem nesta pesquisa.....	77
Figura 4.16 Mapa com a representação dos tipos de solos.....	80
Figura 4.17 Mapa das estações meteorológicas e hidrológicas do modelo	81
Figura 4.18 Dados médios mensais das estações do INMET e AGRITEMPO.....	81

Figura 4.19 Valores mensais dos postos pluviométricos do <i>GlobalWeatherData</i>	81
Figura 4.20 Resultado da análise de sensibilidade a partir dos dados de vazão.....	84
Figura 4.21 Comparação do fluxo mensal durante a calibração e verificação do modelo, por período simulado	86
Figura 4.22 Mudança sensata nos componentes hidrológicos: GWq e SURq	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estatísticas de comparação de erros médios e adequação para cada alcance em ISWAT-L e ISWAT-N.....	35
Tabela 4.1 Dados das classes de solos para a inserção no modelo.....	57
Tabela 4.2 Classes de LULC e respectivos percentuais utilizados para inserção no SWAT ...	57
Tabela 4.3 Períodos utilizados e função detalhada da modelagem	61
Tabela 4.4 Lista dos parâmetros mais sensíveis identificados em alguns estudos de vazão	61
Tabela 4.5 Valores T-Stat e P-Value na calibração e classificação da sensibilidade	62
Tabela 4.6 Critérios para examinar a precisão da calibração e validação do modelo.	63
Tabela 4.7 Extensão proporcional de mudanças de LULC, valores médios anuais da bacia de mudança dos componentes hidrológicos de geração de escoamento para a ABRC no período de 1985 e 2019	65
Tabela 4.6 Classes de LULC para inserção no modelo por período	79
Tabela 4.7 Dados das classes de solos para a inserção no modelo.....	79
Tabela 4.8 Dados climáticos da Estação Posse - 9000164 usados no modelo	82
Tabela 4.9 Valores obtidos do ciclo hidrológico no modelo calibrado	85
Tabela 4.10 Proporção (%) das estatísticas reclassificadas de LULC por período	88
Tabela 4.11 A CCP das variáveis de LULC e geração de escoamento ao longo dos anos de 1985 e 2019	88
Tabela 4.12 Dados do GWq nos diferentes gradientes do relevo cárstico	89
Tabela 4.13 Dados do SURq e ET em diferentes gradientes topográficos.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Etapas da abordagem analítica dos dados na RSL	23
Quadro 2.2 Dados referentes ao modelo utilizado, às modificações e a algumas geotecnologias auxiliares.....	26
Quadro 2.3 Aspectos dos tipos de modelagem conforme registro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	27
Quadro 2.4 Resumo envolvendo categorias de modelagens, dados de entrada e principais resultados de acordo com registros da pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	28
Quadro 2.5 Breve descrição envolvendo o processamento, saída de dados, principais soluções e problemas detectados nos registros da pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019).....	29
Quadro 2.6 Síntese dos trabalhos pesquisados sobre SWAT e as adaptações para o relevo cárstico.....	33
Quadro 2.7 Resumo dos estudos relevantes em modelagem hidrológica cársticas	35
Quadro 3.1 Etapas da abordagem analítica usados na modelagem, contendo dados espaciais e alfanuméricos.....	41
Quadro 3.2 Resumo das informações técnicas dos dados alfanuméricos para a ABRC.....	42
Quadro 3.3 Resumo das fases teórico-metodológicas da pesquisa	44
Quadro 3.4 Delineamento básico das abordagens a partir do enfoque temático na pesquisa ..	47
Quadro 4.3 Valores padrão de correlação das feições	77
Quadro 4.4 Descrição dos conjuntos de dados de entrada no modelo.	78
Quadro 4.5 Resumo das informações técnicas dos dados meteorológicos e hidrológicos	82
Quadro 4.6 Períodos utilizados e função detalhada da modelagem.....	83
Quadro 4.7 Parâmetros mais influentes relacionados ao SURq.....	83
Quadro 4.8 Resumo das informações sobre os eventos básicos simulado pelo modelo.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO SWAT UTILIZADOS NO ESTUDO

SIGLA	DESCRIÇÃO	UNID.
ADJ_PKR	Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos nos canais tributários	adm
ALAI_MIN	Índice mínimo de área foliar durante a dormência	m ² /m ²
ALPHA_BF	Fator constante de recessão de fluxo de base	1/dias
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaço vazio) da qual os ânions são excluídos.	fr
CANMX	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo	mm
CH_K ₁	Condutividade hidráulica efetiva na aluvião do canal tributário	mm/h ¹
CH_K ₂	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal	mm/hr
CH_N ₂	Coefficiente de <i>Manning</i> para o canal principal	m ^{-1/3} .s
CN ₂	Valor da curva número para a condição de solo úmido	adm
DEEPST	Profundidade inicial da água no aquífero profundo	mm H ₂ O
EPCO	Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas	adm
ESCO	Coefficiente de compensação da evaporação do solo	adm
GW_DELAY	Intervalo de tempo de atraso para recarga do aquífero	dias
GW_REVAP	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada	adm
GWHT	Altura inicial do aquífero	m
GWQMN	Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base	mm H ₂ O
HYDGRP	Grupo Hidrológico do Solo (A, B, C ou D)	adm
LAT_SED	Concentração de sedimento no escoamento subsuperficial	mg/L
PRF	Fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos no canal principal	adm
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação do aquífero para aquífero profundo	fr
REVAPMN	Limite de água no aquífero raso para que ocorra ascensão capilar na zona saturada	mm H ₂ O
SHALLST	Profundidade inicial de água no aquífero raso	mm H ₂ O
SLOPE	Declividade média da subbacia	m/m
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta	m
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada de solo (H ₂ O/mm)	mm
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/hr
SOL_Z	Profundidade a partir da superfície do solo até o fundo da camada de solo	mm
SOL_ZMX	Profundidade máxima de enraizamento no solo	mm
SPCON	Parâmetro linear para reentrada de sedimento durante o transporte no canal	adm
SPEXP	Parâmetro exponencial de reentrada de sedimento durante o transporte no canal	adm
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial	adm
USLE_C	Fator C da USLE (fator de cobertura do solo)	adm
USLE_K	Fator K da USLE (fator de erodibilidade do solo)	0,013 ton m ² hr/m ³
USLE_P	Fator P da USLE (fator de práticas conservacionistas)	ton cm adm

LISTA DE SIGLAS

Agricultural Land Close Grown	AGRC
Agricultural Land-Generic	AGRL
Agricultural Land-row	AGRR
Agência Nacional de Águas	ANA
APA Nascentes do Rio Vermelho	ANRV
Área de Proteção Ambiental	APA
Agricultural Research Service	ARS
Alta Bacia do Rio Corrente	ABRC
Curva número	CN
Serviço Geológico do Brasil	CPRM
Digital Elevation Model	DEM
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	EMBRAPA
Environmental Systems Research Institute	ESRI
Evapotranspiração	ET
Food and Agriculture Organization of the United Nations	FAO
Forest Deciduos	FRSD
Forest Evergreen	FRSE
Mixed Forest	FRST
Goiás	GO
Escoamento de subsuperfície	GWq
Hydrological Response Unit	HRU
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	IBGE
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade	ICMBio
Instituto Nacional de Meteorologia	INMET
National Aeronautics and Space Administration	NASA
Coefficiente de eficiência Nash e Sutcliffe	NSE
Operational Land Imager	OLI
Pasture	PAST
Precipitação	PRECIP
Range Grasses	RNGE
Areia	SAND
Sistema Estadual de Geoinformação	SIEG
Sistemas de Informação Geográfica	SIG
Soybean	SOYB
Summer Pasture	SPAS
Sequential Uncertainty Fitting	SUFI-2
Escoamento superficial	SURq
Soil and Water Assessment Tool	SWAT
Produção de sedimentos	SYLD
Texas A&M University, College Station, TX	TAMU
Percent Prediction Uncertainty - Faixa de Incerteza de Predição de 95%	U95PPU
Residential-Medium-Density	URMD
United States of America	USA
United States Department of Agriculture	USDA
United States Geological Survey	USGS
Universal Transversa de Mercator	UTM
Transportation	UTRN
Water	WATR
Datum World Geodetic System	WGS84

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
	ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO MODELO <i>SOIL AND</i>	
	<i>WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) NO RELEVO</i>	
2	CÁRSTICO	20
2.1	APRESENTAÇÃO	20
2.2	INTRODUÇÃO.....	21
2.3	MÉTODO DE TRIAGEM DA PESQUISA.....	22
2.4	MODELO SWAT EM SISTEMAS CÁRSTICOS	23
2.5	ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO SWAT	25
2.5.1	Síntese das pesquisas	27
2.5.2	Alguns procedimentos analíticos do modelo no carste	35
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	APRESENTAÇÃO	38
3.2	ESTRUTURA DA TESE	38
3.3	MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.3.1	Sistema Computacional	40
3.3.2	Dados de entrada no SWAT	41
3.4	ELABORAÇÃO DO MODELO SWAT	42
3.5	MÉTODOS UTILIZADOS.....	44
3.5.1	Métodos de procedimentos	44
3.5.2	Métodos de abordagem	47
3.5.3	Organização e tratamento dos dados.....	48
3.5.3.1	Correlação do runoff	48
3.5.3.2	Tratamento das imagens	48
4	RESULTADOS DA PESQUISA	50
4.1	APRESENTAÇÃO.....	50

4.2	IMPACTOS NA MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO SOB UMA HIDROLOGIA COM FEIÇÃO CÁRSTICA (NORDESTE GOIANO - BRASIL)	52
4.2.1	Apresentação	52
4.2.2	Introdução	54
4.2.3	Área de estudo	55
4.2.4	Modelagem hidrológica	58
4.2.4.1	<i>O SWAT</i>	58
4.2.4.2	<i>Dados de entrada no SWAT e avaliação da precisão</i>	58
4.2.4.3	<i>Calibração e validação do modelo</i>	61
4.2.4.4	<i>Critérios de avaliação do desempenho</i>	62
4.2.5	Análises e correlações	62
4.2.5.1	<i>Avaliação do desempenho do SWAT</i>	63
4.2.5.2	<i>Impactos das mudanças de LULC nos componentes hidrológicos da bacia</i>	65
4.2.6	Conclusões	67
4.3	DESAFIOS NA CORRELAÇÃO ENTRE OS FATORES AMBIENTAIS E O PADRÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO NO TRECHO SUPERIOR DA BACIA DO RIO CORRENTE (GO)	69
4.3.1	Apresentação	69
4.3.2	Introdução	71
4.3.3	Materiais e métodos de modelagem	73
4.3.3.1	<i>Classificação do LULC e avaliação da precisão</i>	74
4.3.3.2	<i>A modelagem e suas etapas</i>	77
4.3.4	A análise estatística do modelo	84
4.3.5	O comportamento hidrológico no modelo	85
4.3.6	Matriz de transferência da mudança LULC na bacia	87
4.3.7	Padrão do escoamento no relevo na bacia	89
4.3.8	Conclusão	91
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1	RECOMENDAÇÕES	95
5.2	CONCLUSÃO	96
5	REFERÊNCIAS	100

CAPÍTULO 1

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O paradoxo existente entre a conservação dos recursos naturais e as pressões exercidas pelas atividades antrópicas (NIE et al., 2011; SAMAL; GEDAM, 2021) principalmente sobre o Uso da Terra/Cobertura do Solo, em inglês, *Land Use/Land Cover* (LULC), induzem a uma alteração considerável na superfície terrestre, assim como afeta o clima regional, os recursos hídricos, o solo, a biodiversidade, o ciclo de carbono e bioquímico na região, de modo a repercutir definitivamente na estrutura e função da bacia (SILVA, 2014; TIAN et al., 2016; ARAÚJO; FIGUEIREDO, 2021).

Desta forma, nas últimas décadas o emprego de modelos hidrológicos para operacionalizar a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas deve ser baseado em métodos eficazes a fim de identificar a capacidade de simulação do comportamento dos componentes hidrológicos, com vistas à compreensão dos impactos ocasionados pelo LULC, fatos que têm atraído a atenção de muitos estudiosos e organizações, gerando o aumento da confiabilidade e manutenção dos resultados dentro de níveis aceitáveis de aplicação (MALAGÒ et al., 2016; SIMÕES, 2019; ARAÚJO; FIGUEIREDO; SOUTO, 2022).

Segundo Hou e Gao (2019) o padrão de geração do escoamento está vinculado aos componentes do ciclo hidrológico, tais como: o *Surface Runoff* (SURq), em português, Escoamento Superficial, o *Groundwater Runoff* (GWq), em português, Escoamento de Águas Subterrâneas e a *Evapotranspiration* (ET), em português, Evapotranspiração em ambientes cársticos em diferentes escalas. Todavia, a influência que estes componentes hidrológicos causarão em cada classe de LULC auxilia os tomadores de decisões na gestão da Bacia Hidrográfica quanto à previsão dos impactos ambientais, o monitoramento e/ou a mitigação (NIE et al., 2011; NIKOLAIDIS; BOURAOUI; BIDOGLIO, 2013).

Igualmente, a geração de escoamento em uma bacia hidrográfica com ambiente cárstico desempenha um papel importante na retenção da umidade do solo, isto porque eles agregam benefícios das condições naturais e as utilidades fornecidas por processos hidrológicos e ecológicos, alterando a evapotranspiração, as taxas de infiltração e interceptação sobre os recursos hídricos (TIAN et al., 2016; HOU; GAO, 2019; SAMAL; GEDAM, 2021). Devido aos processos inerentes ao ciclo hidrológico e ao balanço de massa d'água, diversos indicadores da geração de escoamento estão relacionados e interagem entre si (TIAN et al., 2016; HOU; GAO, 2019; BRASIL, 2022).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), em português, ferramenta de Avaliação do Solo e da Água, possui interface acoplada no *ArcGISDesktop*, que permite o desenvolvimento de simulações do efeito das mudanças de LULC associado a respostas hidrológicas, o que favorece a obtenção dos parâmetros e variáveis. No modelo SWAT, a simulação de escoamento é realizada usando diferentes módulos, tais como: o *Surface Runoff* (SURq), o *Groundwater Runoff* (GWq) e a confluência fluvial (HOU; GAO, 2019).

Desta forma, os modelos hidrológicos são amplamente utilizados na avaliação do impacto na mudança do LULC sob os processos hidrológicos e topográficos em bacias hidrográficas de diferentes escalas (MALAGÒ et al., 2016; HOU; GAO, 2019), pode fornecer uma melhor compreensão dos fenômenos, além de auxiliar os gestores públicos interessados e pesquisadores, na tomada de decisões mais viáveis, seguras e sustentáveis (AMATYA; JHA; EDWARDS, 2011; MALAGÒ et al., 2016; VIGIAK et al., 2017).

Entre os diversos trabalhos que envolveram a temática em questão, Tian et al. (2016) buscou entender melhor a magnitude das cargas hidrossedimentológicas em virtude das mudanças de LULC nas subbacias, em prol da ampliação da cobertura vegetal para manter a fertilidade do solo, amortecendo o escoamento e a erosão do solo. Hou e Gao (2019) verificaram o comportamento do escoamento de uma área cárstica de difícil recobrimento, por meio da análise hidrológica, correlacionando fatores ambientais com a geração de escoamento. Tal estudo, constatou que o terreno é um fator significativo, variando significativamente conforme as características topográficas e geológicas, devido a infiltração rápida pelas rochas calcárias que refletem em efeitos de retenção de água combinados com tipos de LULC.

No Brasil, há trabalhos como o de Melo (2017) e Martinez e Gomes Sobrinho (2018), contudo há lacunas nas pesquisas sobre mudanças dos componentes hidrológicos, correlacionados com a mudança de LULC, a partir do ambiente do Cerrado sob o *background* de restauração ecológica.

Diante de tal quadro de restauração de LULC em oposição ao grau de ameaça ao sistema hidrológico da bacia, o trabalho justifica-se pela necessidade de proteção da porção relevante dos ambientes cársticos vulneráveis, tendo em vista que existem poucas pesquisas sobre a temática e a área em si, o que pode auxiliar futuramente na gestão e manejo do solo nas áreas de cavernas, em escala mais detalhada, nas bacias hidrográficas.

Tem-se como hipótese de que as alterações de LULC e dos seus respectivos impactos sobre a geração do Escoamento Superficial (SURq), Subsuperficial (GWq) e Evapotranspiração (ET) tem influenciado a hidrologia da bacia, inclusive nas porções que envolvem o sistema cárstico, podendo ser previstos pelo SWAT para descrever tais processos e por meio da metrificação dos sedimentos armazenados nas regiões das cavernas e induzidos pela supressão vegetal proveniente da pecuária.

Nesse sentido, a abordagem para analisar os efeitos das mudanças do LULC na hidrologia de superfície e subsuperfície por dois períodos, pode ser amplamente aplicada numa variedade de outras bacias hidrográficas de sistemas cársticos. O objetivo deste estudo consistiu em analisar o impacto das mudanças no LULC sob a hidrologia a partir do uso de técnicas de geoprocessamento em uma bacia, que abrange uma porção relevante sob ambiente cárstico.

Para desenvolver este trabalho e caracterização da variação espacial, vislumbra-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar quais são os parâmetros mais relevantes e significativos de simulação do processo do ciclo hidrológico no modelo SWAT;
- Analisar a correlação estatística espacial existente entre a influência nas taxas de transferência de mudança do LULC e dos componentes hidrológicos na geração de escoamento superficial, de subsuperfície e de evapotranspiração;
- Identificar o padrão espacial da geração de *runoff* superficial, o subsuperficial e da evapotranspiração na bacia a partir da utilização do modelo calibrado;
- Estimar aspectos do gradiente com base em fatores topográficos.

CAPÍTULO 2

2 ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO MODELO *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT) NO RELEVO CÁRSTICO

2.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo compreende o referencial teórico da tese, onde discorremos sobre a conceituação, a funcionalidade, a construção e os principais problemas encontrados no desenvolvimento dos modelos visando embasar o conhecimento acerca dos processos empregados para a realização dos objetivos determinados na pesquisa.

Nele agregamos o artigo científico submetido a Revista Caminhos da Geografia ligada à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), aceito e publicado, que discorre sobre os principais aspectos relacionados à aplicação do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e o estado da arte em bacias hidrográficas contendo relevo cárstico, o *status* atual do conhecimento, as técnicas de modelagem, a potencialidade na estimativa de parâmetros e das variáveis.

ARTIGO I

REVISTA CAMINHOS DE GEOGRAFIA

<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/>

ISSN 1678-6343

DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG238960294>

ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NO RELEVO CÁRSTICO

Ludmagna Pereira de Araújo

Universidade de Brasília – UNB

Brasília, Distrito Federal, Brasil

lparaju@yahoo.com

Vânia Santos Figueiredo

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

vanciasfigueiredo@gmail.com

Michael Vandesteen Silva Souto

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

michael.souto@geologia.ufrn.br**RESUMO**

Pesquisas sobre aplicação de modelos matemáticos em bacias hidrográficas (BH) com relevo cárstico são escassas no Brasil. O SWAT é um dos modelos hidrológicos mais utilizados internacionalmente, sendo capaz de simular diferentes processos hidrológicos em diversas escalas através de longas séries temporais. A aplicação destes modelos possibilita analisar e entender o funcionamento dos componentes de um aquífero, porém a simulação dos processos físicos e hidrológicos variam muito quanto à empregabilidade dos métodos e das técnicas usadas para a realização desses estudos. Logo, este artigo tem como objetivo destacar as principais aplicações do SWAT para bacias situadas em sistema de relevo cárstico. A metodologia da pesquisa abrangeu três etapas da Revisão Sistemática de Literatura (RSL): a) planejamento; b) técnica de seleção; e c) avaliação. Foram selecionados 19 estudos internacionais com RSL. Todavia, quatro estudos nacionais tiveram destaque; destes, três em bacias do bioma Cerrado. Com base nesta investigação, foram identificadas lacunas nas pesquisas envolvendo a temática, assim como estratégias para detecção da sensibilidade dos parâmetros e das variáveis, prejuízos e benefícios relativos à geração de escoamento em uma bacia de difícil recobrimento por métodos tradicionais.

Palavras-chave: Revisão sistemática de literatura. Geração de escoamento. Modelagem hídrica. Uso da terra.

STATE OF THE ART: APPLICATION OF THE SWAT MODEL IN CARSTIC RELIEF**ABSTRACT**

Research on the application of mathematical models in watersheds (BH) with karst relief is scarce in Brazil. SWAT is one of the most used hydrological models internationally, being capable of simulating different hydrological processes at different scales through long time series. The application of these models makes it possible to analyze and understand the functioning of the components of an aquifer, but the simulation of physical and hydrological processes varies greatly as to the employability of the methods and techniques used to carry out these studies. Therefore, this article aims to highlight the main applications of SWAT for basins located in a karst relief system. The research methodology covered three stages of the Systematic Literature Review (SLR): a) planning; b) selection technique; and c) evaluation. We selected 19 international studies with SLR. However, four national studies stood out; of these, three in basins of the *Cerrado* biome. Based on this investigation, we identified gaps in research involving the theme, as well as strategies for detecting the sensitivity of parameters and variables, losses and benefits related to the generation of runoff in a basin that is difficult to cover by traditional methods.

Keywords: Systematic literature review. Runoff generation. Water modeling. Land use.

2.2 INTRODUÇÃO

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) congrega diversos algoritmos que simulam os processos físicos, químicos e biológicos em escala de bacia hidrográfica (SWAT, 2021). Simula bacias de diferentes escalas, a partir de um conjunto de dados necessários para representar respostas dos processos hidrológicos que ocorrem, por exemplo, no balanço hídrico (SPRUILL, WORKMAN e TARABA, 2000; NEITSCH et al., 2011; TIAN et al., 2016; HOU e GAO, 2019; ARAÚJO e FIGUEIREDO, 2021). A modelagem hidrossedimentológica consegue representar processos do ciclo hidrológico (SWAT, 2021). Neitsch et al. (2011) enfatizam que o ciclo hidrológico é um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos espaço-temporais percorridos pelos processos hidrológicos e sedimentológicos em bacias.

Uma mensuração sistemática é importante para apoiar a gestão e dar suporte à tomada de decisão visando prognosticar o impacto no solo e nos recursos hídricos (AFINOWICZ, MUNSTER e WILCOX, 2005; BAFFAUT e BENSON, 2009; AMATYA et al., 2011; WANG e BRUBAKER, 2014). Desta forma, o uso de geotecnologias é de fundamental importância na geração desses modelos, que visam expressar e mensurar a dinâmica dos recursos naturais e suas relações, a partir da análise das multivariáveis do modelo (VALE e HOLMAN, 2009; NIKOLAIDIS, BOURAOUI e BIDOGLIO, 2013; WILLIAMS et al., 2014; SULLIVAN e GAO, 2017; VIGIAK et al., 2017).

Malagò et al. (2016), Araújo e Figueiredo (2021) observaram que tem crescido bastante o uso de novos métodos para integrar as tecnologias, assim como registros da pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES; BRASIL, 2019) expressando o número de publicações voltadas para o emprego de novas orientações teórico-metodológicas referentes à aplicação do SWAT em bacias hidrográficas (BH) com feições calcárias. Nesse propósito, novas tecnologias aliadas à ciência geográfica favorecem novas formas de pensar e refletir sobre o espaço geográfico, as interações homem-natureza, os conceitos, as teorias e os métodos empregados nas pesquisas. Neste contexto, o propósito deste trabalho foi discutir os artigos internacionais e metodologias empregadas na aplicação do SWAT em sistemas cársticos, de forma automatizada ou não, pela revisão da literatura específica. A análise dos estudos desde os clássicos sobre a temática envolvida foi obtida a partir de suas definições, das entradas e saídas do modelo, o processamento utilizado para determinado recurso natural e a solução ambiental.

Ainda nessa perspectiva, a escolha deste estudo é uma tentativa de discutir o desenvolvimento teórico-metodológico ao nível internacional, no campo do conhecimento de cunho geográfico, entre outros, bem como conhecer as técnicas voltadas para modelagem dos fluxos pelos canais em ambientes de rochas calcárias utilizando o modelo. Desta forma, Araújo et al. (2004) frisam que a integradora plataforma do Sistema de Informações Geográficas (SIG) proporciona novas formas de refletir o espaço geográfico, acessível a diversas áreas do conhecimento, abstraindo o mundo real para o computacional, possibilitando unir materiais e métodos de gerenciamento do território a partir dos dados de entrada (dado alfanumérico, *raster* e vetor).

Além disso, o SIG favorece a utilização de algoritmos para realização de complexas equações e detecção de quais parâmetros e/ou variáveis são mais sensíveis, entre outros. Nesse sentido, os modos de organização do ambiente modificado pelo homem levam pesquisadores a repensarem métodos de aplicação dos grandes conjuntos de dados dinâmicos, originando resultados eficazes, de maior confiabilidade e o mais próximo possível da realidade (MALAGÔ et al., 2016; TIAN et al., 2016; HOU e GAO, 2019; ARAÚJO e FIGUEIREDO, 2021). Neste contexto, o propósito deste trabalho foi discutir os artigos internacionais e as metodologias empregadas na aplicação do SWAT em ambientes cársticos, de forma automatizada ou não, pela revisão da literatura específica em língua portuguesa, de pesquisas que tiveram bons resultados. Logo, a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) narrativa, favorece a detecção das abordagens e das principais lacunas de pesquisas (SOUZA et al., 2019). O presente estudo insere-se em uma pesquisa de doutorado, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade de Brasília (UnB).

2.3 MÉTODO DE TRIAGEM DA PESQUISA

A fundamentação teórica e metodológica deste artigo está calcada no levantamento de publicações (revistas e/ou jornais) com o intuito de analisá-los, observando a evolução das técnicas que podem ser apreendidas, para obter novas capacidades e habilidades acerca das variáveis que abordam a temática. Este trabalho visou reunir os estudos que aplicaram o SWAT no complexo ambiente de rochas carbonáticas. Para isso, foram ilustrados os meios e as diversas técnicas empregadas, além das teorias e manuseio do modelo.

Conforme Souza et al. (2019), a RSL é um método de revisão do “estado da arte”, de caráter bibliográfico, visa coletar, avaliar, sintetizar e manter atuais os pontos relevantes de estudos anteriormente publicados, aplicando uma metodologia clara e reprodutível. Nesse cenário, a pesquisa bibliográfica foi realizada em maio de 2019. Contudo, a revisão da literatura abrangeu uma abordagem analítica dos dados,

envolvendo as seguintes etapas: a) planejamento; b) técnica de seleção; e c) avaliação. No **Quadro 2.1**, estão descritas cada uma das etapas da revisão.

Quadro 2.1 Etapas da abordagem analítica dos dados na RSL

ETAPA	ABORDAGEM ANALÍTICA DOS DADOS
1	Buscou-se pelos termos “SWAT” e “Karst” expressos na língua inglesa, a partir da pesquisa no Portal da CAPES (BRASIL, 2021) através da plataforma indexadora <i>Web of Science</i> . Foram levantados 22 estudos. Destes, 19 estudos internacionais foram selecionados entre os anos de 2000 e 2019 com RSL da literatura, para verificar as tendências de publicação. Os critérios selecionados referem-se a processos hidrossedimentológicos com resultados satisfatórios.
2	Extração dos materiais e técnicas relevantes, vislumbrando questões de análise, tais como: <ul style="list-style-type: none"> i) que tecnologias e fontes foram utilizadas, métodos de preparo dos dados, formatos e armazenamento? ii) o que é necessário para adaptar o modelo? Como fizeram? iii) quais foram e como apresentaram as saídas do modelo? iv) quem trabalhou com ambiente de cavernas, sumidouros, modelo hídrico e sedimentar? v) quais foram as contribuições, progressos e problemas detectados durante a pesquisa (lacunas)?
3	Avaliação dos resultados.

Fonte: Os autores (2022)

A compilação do material anteriormente mencionado foi estruturada com base no objetivo deste artigo, conforme quatro critérios definidos, a saber: a) dados de entrada; b) processamento; c) saídas dos dados; e d) problemas e soluções. A seguir, há uma breve definição de cada um desses critérios.

a) Dados de Entrada: trata de aspectos relevantes no delineamento das bacias, composição das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU), cobertura da terra, solos, topografia e dados multitemporais das estações meteorológicas.

b) Processamento: consiste nos procedimentos metodológicos relevantes e pouco corriqueiros, envolvendo a simulação.

c) Saídas dos dados: criação de cenários e resultados alcançados.

d) Problemas e soluções: tratam da evolução do estudo e dos ajustes necessários para modelar o ambiente cárstico.

Nesse cenário, foi observado no levantamento feito que a primeira publicação surgiu em 2000 e o número de artigos gerado para o tema desta pesquisa triplicou a partir de 2013. A intenção do levantamento foi de avaliar o modelo utilizado, parâmetros e demais soluções encontradas nos estudos, observação dos comandos, parâmetros e variáveis mais utilizáveis, além dos resultados alcançados, voltados para o modelamento dos processos hidrossedimentológicos no relevo cárstico.

De acordo com alguns conceitos aprendidos no Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade de Brasília, buscou-se detectar novos fatos e fenômenos, observados de forma distinta que mais se destacaram. Após a leitura, considera-se que a organização dos estudos segue uma sistematização, com objetivos bem definidos, análise da temática, destacando partes importantes dos textos, com a intenção de identificar uma evolução teórico-metodológica desses estudos.

2.4 MODELO SWAT EM SISTEMAS CÁRSTICOS

Conforme o levantamento dos estudos realizados na pesquisa da plataforma *Web of Science*, o SWAT é um modelo matemático que vem sendo aplicado recentemente, a partir do ano 2000, em bacias hidrográficas cársticas. Desta forma, o SWAT desenvolvido em 1996 pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e *Texas A. & M. University College Station* (TAMU) nos *United States of America* (USA) vem sendo atualizado, incorporando uma evolução das versões anteriores através de algoritmos que vinculam equações diversas. Possui código livre e utiliza ‘interface’ vinculada à plataforma SIG.

Baffaut e Benson (2009) consideram que as atividades antrópicas, tais como agricultura, pecuária, turismo e áreas urbanizadas, acentuam ainda mais os potenciais de contaminação das bacias

calcárias. Logo, a modelagem de aquíferos cársticos é importante para poder entender o funcionamento dos componentes dos aquíferos raso e profundo, do balanço hídrico e do fluxo, para definição do melhor gerenciamento e manejo desses valiosos recursos.

Por conseguinte, o emprego do modelo auxilia gestores ambientais no diagnóstico de bacias, em prol do manejo dos elementos da paisagem calcária, ligados aos fatores do ciclo hidrológico, sejam eles de fluxo, recarga e descarga do aquífero, que estão associados aos dados da topografia, categorias de solo e de uso da terra (BAFFAUT; BENSON, 2009). Nesse sentido, Baffaut e Benson (2009) ponderam que os sistemas cársticos são originados da paisagem geológica de rocha sedimentar, cuja composição primária é de carbonatos, com meio poroso amplo e complexo, poros de tamanhos diversos, que, em contato com a ação dissolvente da água, torna-se quimicamente solúvel.

Com relação ao ciclo hidrológico, a água das chuvas é uma fonte de energia primária, a qual remodela as rochas carbonáticas, leva embora os íons por dissolução e atua como um agente modelador do relevo, infiltrando-se através da rocha calcária, dando origem a uma hidrologia com relevo cárstico, induzindo na formação de múltiplas nascentes, sumidouros, cavernas e córregos temporários, com conexões diretas entre águas superficiais e subterrâneas, através do sistema aquífero fissural-cárstico, cujas nascentes, riachos e lençóis freáticos estão passíveis de contaminação (MALAGÔ et al., 2016).

Para Baffaut e Benson (2009), com a progressiva dissolução da rocha carbonática, o fluxo de água subterrânea e dos grandes vazios verticais no aquífero cárstico migra de um pequeno e simples escoamento de uma rede de fissuras inter-relacionadas para um complexo e concentrado escoamento por vários canais interconectados, constituindo sistemas de cavernas. Sendo assim, esses recursos hídricos contêm conexões diretas entre as águas superficiais e subterrâneas, havendo um potencial risco de contaminação de seus riachos, nascentes e lençóis freáticos.

Todavia, o ponto de saída comumente é um sumidouro. Trata-se da extremidade a jusante de um sistema aquífero fissural-cárstico, onde o conduto subterrâneo atinge a superfície (MALAGÔ et al., 2016). Por tudo isso, os aquíferos cársticos e suas nascentes são importantes fontes de abastecimento, necessitando de táticas especiais para gerenciamento da quantidade e da qualidade de suas águas.

No entanto, é recomendável empreender metodologias abrangentes nos ambientes cársticos, para avaliar riscos para gerenciar as águas de forma sustentável (MALAGÔ et al., 2016). Os autores afirmam que, infelizmente, a maioria dos países tem gerenciamento atrasado no monitoramento da descarga de nascentes ou poços, e a exploração de aquífero cárstico, em geral, é ineficaz.

Segundo Hou e Gao (2019), comparado a outros modelos hidrológicos (distribuídos e conceituais), o modelo SWAT é mais indicado porque é estruturado, entre outros, nos processos hidrológicos e erosivos. É eficaz devido à praticidade do universo que envolve as equações, parâmetros e variáveis, quando os dados estão disponíveis.

Salerno e Tartari (2009) preferem que existem três categorias de modelos hidrológicos matemáticos que podem ser aplicados em uma bacia hidrográfica contendo ambientes cársticos, tais como: conceituais empíricos (o mais simples) e teóricos ou físicos, calcados nas leis hidráulicas, assim como nos processos físicos, nos componentes das rochas, na geometria e na posição das fraturas dos condutos sob as interações de fluxo. Em razão disso, os modelos empíricos não pedem dados sobre a estrutura interna de um aquífero, pois carecem de relações dos cálculos entre as séries temporais de entrada e saída, especialmente adequados para aquíferos cársticos.

A partir dos estudos acima mencionados, chegou-se a um breve conhecimento sobre a aplicação do modelo SWAT, para compreensão das abordagens utilizadas pelos autores. A seguir, é apresentado o escopo do estudo, que vislumbra a evolução das técnicas desenvolvidas.

2.5 ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO SWAT

Um modelo hidráulico-hidrológico pode ser usado para desenvolver um plano de manejo eficaz em bacias hidrográficas, visando melhorar a qualidade da água. Todavia, os relevos cársticos exibem desafios singulares no gerenciamento e manejo dos impactos em águas superficiais e subterrâneas.

É fato que as cargas hidrossedimentares deterioram o estado ecológico de corpos de água doce em todo o mundo. Os hidrossedimentos impactam o “habitat” aquático em fatores como turbidez, penetração da luz, temperatura da água e oxigênio biologicamente disponível (BAFFAUT e BENSON, 2009; AMIN et al., 2017; VIGIAK et al., 2017; AMIN et al., 2018).

Entende-se que os estudos preenchem uma lacuna em pesquisas anteriores que utilizaram as características de deflúvios baseados em estatísticas sobre diferentes categorias de uso da terra e índices de escoamento.

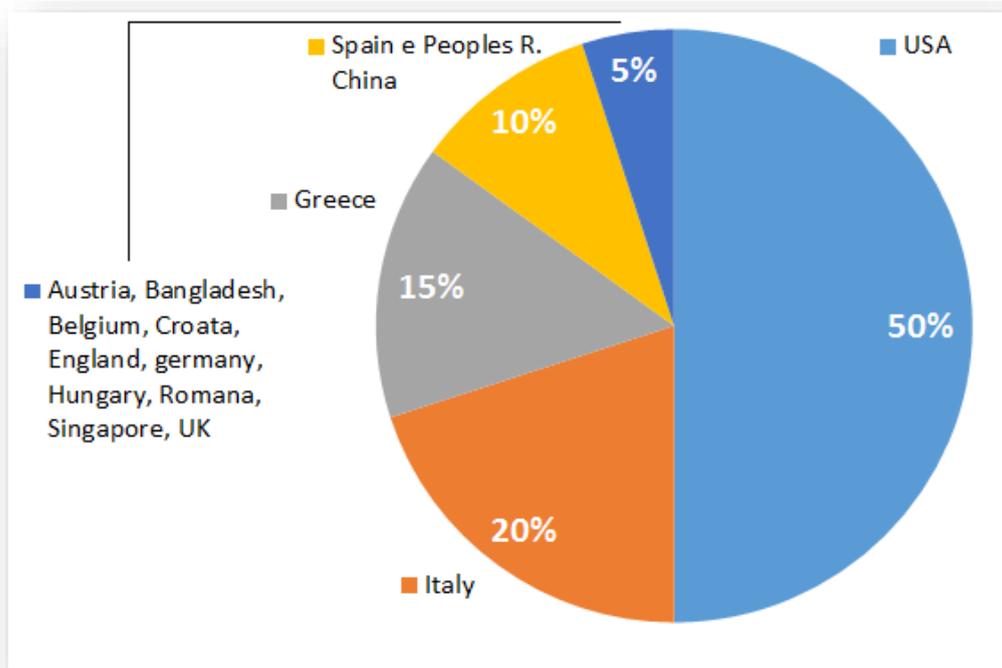
Observou-se que, em seus trabalhos, muitos autores exibem a avaliação satisfatória nos resultados da simulação somente porque algumas combinações de parâmetros atingiram os níveis ideais. Assim, vislumbram a evolução de modelos de simulação e a otimização metódica dos processos hidrológicos, considerando as condições hidrológicas aperfeiçoadas e realistas das áreas calcíferas.

Análogo ao universo da pesquisa, a ocorrência dos principais centros, países/regiões e os registros citados na pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019) estão especificados na **Figura 2.1**.

No tocante ao número total de citações (**Figura 2.2**), o trabalho de Spruill, Workman e Taraba (2000) é o registro mais citado na pesquisa *Web of Science*, pontuando 154 citações, seguido por Baffaut e Benson (2009), com 42 citações, e Salerno e Tartari (2009), com 35 citações.

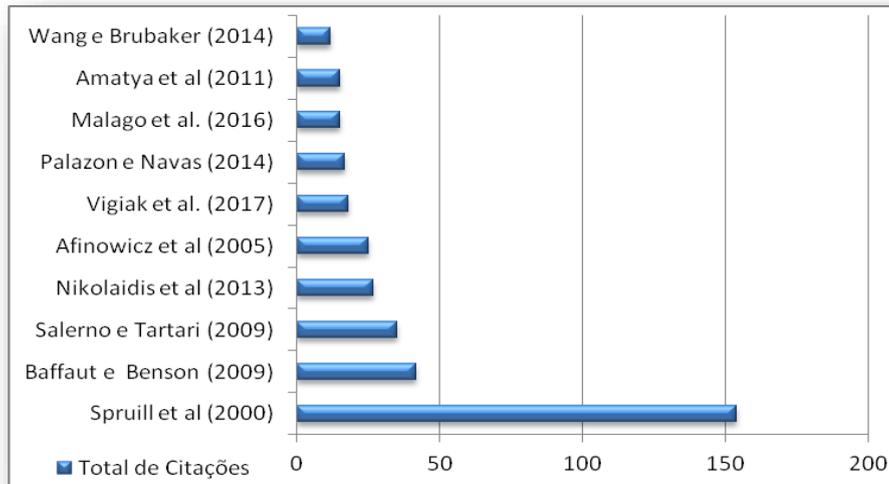
O primeiro autor/ano dos trabalhos selecionados citados na pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019) por número total de citações/ano está disposto no gráfico da **Figura 2.2**.

Figura 2.1 Percentual dos principais países segundo registros da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019)



Fonte: BRASIL (2019)

Figura 2.2 Autor/ano por número de citações/ano conforme registros da CAPES (BRASIL, 2019)



Fonte: BRASIL (2019)

Nesse sentido, de acordo com registros do levantamento da pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019), observou-se crescimento em quantidade e qualidade dos trabalhos que utilizaram o SWAT como modelo de análise em feições calcárias envolvendo processos hidrológicos e sedimentares nas bacias hidrográficas. O trabalho de Spruill, Workman e Taraba (2000) foi um dos primeiros registros no levantamento da plataforma da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019).

O **Quadro 2.2** resume as características de cada estudo, desde categorias de modelagem realizada na pesquisa por trabalho/autores, os ajustes necessários no modelo, a plataforma de dados utilizada, até algumas técnicas alternativas de obtenção dos dados na pesquisa.

Quadro 2.2 Dados referentes ao modelo utilizado, às modificações e a algumas geotecnologias auxiliares

N.º	Refs.	Local	Área	Modelo	Modelagem		Cárstico	Técnica						
					Água	Sedimento		Alterada	Cavernas	Batimetria	Radiometria	LIDAR	LANDSAT	CLC
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Texas, USA	360 km ²	ArcGis	*		*					*		
2	Amatya et al. (2011)	South Carolina, USA	1.555 ha	SWAT2003 ISWAT	*		*	*	*	*	*			*
3	Amin et al. (2017)	Pennsylvania, USA	370 km ²	Regular-SWAT e Topo-SWAT Karst SWAT ArcGis	*	*	*							
4	Amin et al. (2018)	Pennsylvania, USA	370 km ²	Topo-SWAT uma variação do SWAT	*	*	*							
5	Baffaut e Benson (2009)	Missouri, USA	3.600 km ²	AVSWATX. SWAT (2005, SWAT B-B)	*		*							
6	Hou e Gao (2019)	China	4.681 km ²	ArcSWAT	*									
7	Jain et al. (2015)	Texas Hill Country, USA	2.126 km ²	ArcSWAT Versão 2012.10_1.	*									

N.º	Refs.	Local	Área	Modelo	Modelagem		SWAT	Cárstico	Técnica					
					Água	Sedimento	Alterada	Cavernas	Batimetria	Radiometria	LIDAR	LANDSAT	CLC	Foto Aérea
				9 ArcGis 10.1										
8	Malagò et al. (2016)	Ilha de Creta, Grécia	8.336 km ²	SWAT2012 (v.622) KSWAT	*	*	*	*						
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Ilha de Creta, Grécia	132 km ²	ArcSWAT	*		*	*						
10	Palanisamy e Workman (2015)	Kentucky, USA	115.6 km ²	Karst SWAT	*		*						*	
11	Palazón e Navas (2014)	Pirenéus Centrais, Espanha	1.509 km ²	SWAT2009 (versão 93.6) ArcGis (9.3)	*	*							*	
12	Salerno e Tartari (2009)	Lago Pusiano, Itália	52,5 km ²	SWAT2000 ArcSWAT	*									
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Kentucky USA	52,5 km ²	SWAT2000 ArcSWAT	*	*	*							
14	Sullivan e Gao (2017)	Ilha de Creta, Grécia	5,5 km ²	SWAT GRASS (SWRRB) + CREAMS	*						*			
15	Tian et al. (2016)	China	1.077 km ²	ArcSWAT	*	*	*					*		
16	Vale e Holman (2009)	País de Gales, UK	2.248,49 km ²	ArcSWAT	*									
17	Vigiak et al. (2017)	Bulgária, Europa	2.049 ha	SWAT	*	*								
18	Wang e Brubaker (2014)	Virginia, USA	800.000 km ²	ArcSWAT	*		*							
19	Williams et al. (2014)	South Carolina, USA	14.679 m ²	SWAT, ISWAT	*			*						*

Fonte: adaptado de Araújo e Figueiredo (2021, p. 74)

2.5.1 Síntese das pesquisas

Os registros feitos no portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019) foram bem-sucedidos, representando um ícone na temática em questão. Um breve resumo das pesquisas, envolvendo meios, técnicas relevantes e principais teorias no manuseio está exposto nos **Quadro 2.3**, **Quadro 2.4** e **Quadro 2.5**. Observa-se que alguns autores utilizaram a mesma bacia para consolidar seus estudos.

Quadro 2.3 Aspectos dos tipos de modelagem conforme registro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Nº	REF.	MODELAGEM	BACIA
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Modelaram os efeitos no gerenciamento de moitas para provisão da água	A BH associada ao North Fork do Rio Guadalupe Superior em Rangeland, Edwards Plateau. Texas, USA
2	Amatya et al. (2011)	Testaram o SWAT em uma BH cárstica na previsão de processos hidrológicos e na emissão e/ou não de fontes pontuais de contaminação	BH de Chapel Branch Creek (CBC). Carolina do Sul, USA
3	Amin et al. (2017)	Modelaram o transporte de fluxo e poluente	BH de Spring Creek, no Condado de Center. Pensilvânia, USA
4	Amin et al. (2018)	Estudaram o impacto da criação de gado leiteiro na conservação da qualidade da água	BH de Spring Creek, condado de Center. Pensilvânia, USA
5	Baffaut e Benson (2009)	Modelaram o transporte de fluxo e poluente	BH do Rio James. Missouri, USA

Nº	REF.	MODELAGEM	BACIA
6	Hou e Gao (2019)	Simularam a geração de escoamento e sua correlação espacial com fatores ambientais	BH do Rio Sancha, nascente do Sul do Rio Wujiang, China
7	Jain et al. (2015)	Simularam o impacto hidrológico da invasão da planta <i>Arundo donax</i>	BH do Rio Nuances. Texas Hill Country, USA
8	Malagò et al. (2016)	Modelagem hidrológica em escala regional de geomorfologia cárstica dominante	Ilha de Creta. Grécia
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Realizaram uma modelagem hidrológica e geoquímica	BH do Rio Koiliaris. Creta, Grécia
10	Palanisamy e Workman (2015)	Modelagem hidrológica de fluxo através de poços localizados em áreas ribeirinhas	BH cárstica em Cane Run Stream. Kentucky, USA
11	Palazón e Navas (2014)	Modelaram fontes e rendimentos de sedimentos em uma bacia dos Pirenéus que drena para um grande reservatório	BH do reservatório de Barasona, na bacia do Ebro. Pirenéus Centrais, Espanha
12	Salerno e Tartari (2009)	Modelagem hidrológica de superfície e Análise Wavelet (W.A.) para entender os componentes do fluxo de base da descarga fluvial em ambientes cársticos	Lago Pusiano, pertencente à BH de Caslino situada no extremo Sul dos Alpes. Itália.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Simularam a descarga diária e mensal de córregos de pequenas bacias hidrográficas usando o SWAT	Condados de Jessamine e Woodford, Lexington. Kentucky USA
14	Sullivan e Gao (2017)	Trabalharam com o método P3, método COP, vulnerabilidade de aquíferos e contaminação por nitrato; índice de intensidade de risco	Bacia do Rio Koiliaris, em Creta
15	Tian et al. (2016)	Estudaram trocas entre os ecossistêmicos na bacia com feição cárstica	BH Shibantang karst na China, província de Guizhou
16	Vale e Holman (2009)	Pesquisaram o funcionamento hidrológico de um sistema de lago raso em um aquífero cárstico costeiro	BH de Bosherton. País de Gales, UK
17	Vigiak et al. (2017)	Modelagem de fluxos de sedimentos na bacia	BH do baixo do Rio Danúbio. Bulgária. Europa
18	Wang e Brubaker (2014)	Implementaram um módulo não linear de água subterrânea no SWAT	Vale de Shenandoah. Rio Potomac até Point Lookout Maryland. Virginia, USA
19	Williams et al. (2014)	Pesquisaram o fluxo com uma remessa a jusante no escoamento de nutrientes em uma BH de feição calcária	Planície costeira de Orangeburg County BH de Chapel Branch Creek (CBC), Lago Marion. South Carolina, USA

Fonte: Os autores (2022)

Quadro 2.4 Resumo envolvendo categorias de modelagens, dados de entrada e principais resultados de acordo com registros da pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Nº	REF.	DADOS DE ENTRADA	RESULTADOS
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	O uso compreende pastagem, reservatório (RE) e campo cultivado, obtidos do satélite LANDSAT e imagens aéreas. Escala de 1:24.000. Resolução vertical de 0,001 do <i>Digital Elevation Model</i> (DEM).	A remoção da cobertura da moita pesada resultou nas maiores alterações na evapotranspiração, no escoamento superficial, no escoamento de base e na recarga profunda. A inclinação foi encontrada para ter o maior efeito no fluxo lateral subsuperficial.
2	Amatya et al. (2011)	A cobertura consistiu de áreas agrícolas e florestais e um campo de golfe. Utilizaram DEM na escala 1: 24.000, imagem <i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR) e dados de curva de nível a jusante do lago.	O SWAT foi capaz de simular com precisão o fluxo mensal de descarga de água subterrânea somente após adicionar insumos subsuperficiais mensais como fonte pontual naquele local.
3	Amin et al. (2017)	O uso da terra foi de área urbana (23%), floresta (43%) e campo cultivado (34%). Utilizaram dados de solo da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO).	Os valores observados corresponderam às distribuições de nutrientes entre vias de transporte, como lixiviação e escoamento superficial.
4	Amin et al. (2018)	Inseriram dados de práticas de manejo, rotações gerais de cultura e operações agrícolas no SWAT regular, tais como: adubação, semeadura, colheita, entre outros.	Ao utilizar práticas de conservação na fazenda, haverá redução da poluição proveniente de fontes não pontuais e da erosão do solo com relação às fazendas leiteiras que não empregam Boas Práticas de Gestão (BPM).
5	Baffaut e Benson (2009)	O insumo de uso da terra foi classificado por pasto, áreas urbanas, floresta, campo cultivado e campos sépticos.	Os resultados indicaram que: a) as mudanças melhoraram a partição do fluxo entre superfície e fluxo de retorno e b) a qualidade da água indicou que o SWAT pode ser usado para simular a frequência da ocorrência das concentrações de poluentes e cargas diárias.
6	Hou e Gao (2019)	Com base na quantificação da fragmentação da paisagem, um modelo de Regressão Geométrica Ponderada (GWR) foi usado para examinar as correlações espaciais com fatores ambientais.	Resultou em dados da variabilidade espacial da cobertura e do escoamento total superficial/subterrâneo analisado juntamente com os métodos de análise de gradiente e regressão local.
7	Jain et al. (2015)	A Análise do modelo com base em SIG na Web (WHAT) foi usada para separar o fluxo medido em componentes de fluxo de base e fluxo de uma tempestade.	As vazões mostraram uma tendência positiva (levemente crescente) durante o período pré-invasão e uma tendência negativa (ligeiramente decrescente) durante os períodos pós-invasão. A estatística não paramétrica de Kendall teve êxito, a qual analisou os dados do fluxo de base e do escoamento.
8	Malagò et al. (2016)	Consistiu da cobertura do solo (Agricultura e Estatística da Grécia). Solo derivado do <i>raster</i> de 01 km da base mundial de solo da FAO.	As medições das descargas das nascentes foram calculadas diretamente medindo-se a velocidade uma vez por mês na geometria do canal transversal levantado em 47 postos permanentes.
9	Nikolaidis, Bouraoui e	Para medição a vazão da nascente, utilizou-se uma série de 31 anos e 1 ano de coleta de dados	O SWAT foi modificado para simular as respostas hidrológica e química de sistemas cársticos e avaliar os impactos da gestão

Nº	REF.	DADOS DE ENTRADA	RESULTADOS
	Bidoglio (2013)	amostrais para nitrato. Os demais tiveram 3 anos de coleta de dados.	do uso da terra e das mudanças climáticas, gerido de forma intensiva na bacia.
10	Palanisamy e Workman (2015)	Tipo de solo predominante (FAO), mapa de uso da terra do <i>Corine Land Cover</i> (CLC)	Aplicação do método de fluxo pontual incorporado no modelo para modelagem de sumidouros na feição carste.
11	Palazón e Navas (2014)	Os insumos climáticos foram dados diários mínimos e máximos de temperatura e precipitação, que fornecem a umidade, registros diários de precipitação de quatro estações.	O KarstSWAT foi capaz de reproduzir os hidrogramas, sendo observado melhor do que o SWAT em termos de fluxo de pico e volume no hidrograma.
12	Salerno e Tartari (2009)	Mapa pedológico (1:50.000), DEM, mapa de inclinação, carta litologia extraída da carta geoambiental 1:10.000. Clima precipitação e temperatura gerou o balanço hídrico.	A W.A auxiliou na análise de séries de dados gerados para interpretar descargas de sumidouros e descrever a variabilidade de fluxos provenientes dos condutos cársticos, porém os poluentes não puderam ser medidos diretamente nas concentrações de coliformes fecais.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	O fluxo foi monitorado em intervalos de cinco minutos, a média de cada dia foi comparada.	Como pouca informação estava disponível sobre a sensibilidade do SWAT, um procedimento de calibração foi projetado para avaliar parâmetros que influenciam previsões de descarga.
14	Sullivan e Gao (2017)	A ferramenta SINK no ArcGIS foi usada para identificar depressões fechadas. Os erros de dados são normalmente removidos usando a ferramenta FILL para eliminar depressões abaixo de certa profundidade.	Os resultados do método P3 indicam que os dados de sensoriamento remoto são um método viável para identificar vulnerabilidades nos recursos cársticos que não foram mapeados anteriormente.
15	Tian et al. (2016)	O SWAT e o <i>Carnegie-Ames-Stanford Approach</i> (CASA) calcularam a produtividade primária líquida (NPP). Dados de sensoriamento remoto LANDSAT 7-ETM+ e eCognition 9.1 para classificar e segmentar os tipos de paisagem.	Os rendimentos de sedimentos e água exibiram uma tendência decrescente, enquanto a NPP foi inversamente variada. A NPP está em relação de escoamento com a produção de água e a produção de sedimentos.
16	Vale e Holman (2009)	Os dados observacionais das variáveis de clima/tempo foram utilizados no processo de calibração.	A descarga de águas subterrâneas costeiras tem origem tanto no escoamento dos lagos quanto no fluxo de águas subterrâneas em larga escala, anteriormente não reconhecidos, em aquífero de rochas calcárias.
17	Vigiak et al. (2017)	A gestão de sedimentos para a prestação de serviços econômicos e ambientais é abrangente. Utilizaram dados de postos coletados no percurso do rio.	Propôs modificações para adaptar o modelo original de sedimentos do SWAT a grandes bacias. A erosão de barrancos, os deslizamentos de terra e os processos de erosão de geleiras não puderam ser incluídos.
18	Wang e Brubaker (2014)	Modelo ISWAT modificado. ISWAT ambos necessitam de dados de precipitação e temperatura.	As observações do ISWAT mostram que essa suposição nem sempre é aplicável; por exemplo, nos macroporos em formações cársticas, pois afetariam seriamente o comportamento da água subterrânea.
19	Williams et al. (2014)	Compreendem áreas rurais, residenciais, de lazer, comerciais, industriais, terras agrícolas, florestais, estação de tratamento de águas residuais.	O balanço hídrico indicou um tempo de permanência que varia de seis a nove semanas. A importância do nitrogênio na descarga da nascente nas cavernas, em menor grau, o orçamento de fósforo na bacia e o papel da interação do nível do lago com o poço reduziram descargas das bacias para o lago.

Fonte: Os autores (2022)

Quadro 2.5 Breve descrição envolvendo o processamento, saída de dados, principais soluções e problemas detectados nos registros da pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019)

Nº	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Simularam as condições com a cobertura de arbustos existentes em quatro cenários diferentes de remoção de arbustos. Na simulação, houve um registro climático ao longo de 15 anos, dividido em três fases distintas, de 5 anos cada: aquecimento, calibração e validação. Na calibração, utilizaram valores padrão como CN2 e parâmetros de água subterrânea variando primeiro dentro dos intervalos de vazão, depois para qualidade da água. Adicionaram ponto de fonte poluente de subsuperfície para realização da simulação. Foi introduzido um algoritmo de águas subterrâneas não lineares.	Criaram cenário para representar a remoção dos arbustos que estavam em locais com declive moderado ou em solos rasos. A CN2 teve base no tempo antecedente, resultando no controle do fluxo superficial.	Resultou nas maiores alterações na evapotranspiração, na recarga profunda, nos fluxos superficial e de base. A inclinação acarretou maior efeito no fluxo lateral e subsuperficial.
2	Amatya et al. (2011)	Para simular esta BH cárstica, foram feitas representações apropriadas de águas superficiais, interações de águas subterrâneas, áreas de descarga e recarga de nascentes.	Este esforço de modelagem pode ter implicações nas estimativas de nutrientes e de carreamento de sedimentos para o desenvolvimento e implementação de Carga Máxima Total Diária (TMDL) em bacias com grandes enseadas a jusante que têm mudanças significativas no nível da água devido aos lagos adjacentes.	Os resultados demonstraram a influência substancial das características cársticas no balanço hídrico, com conduto e fluxo difuso como uma explicação para a falta de fluxos a montante.
3	Amin et al. (2017)	Para simular esta BH cárstica, foram feitas representações apropriadas de águas superficiais, interações de águas subterrâneas, áreas de descarga e recarga de nascentes.	As estimativas de carga total (518 t nitrogênio/ano, 45 t fósforo/ano e 13.600 t sedimento/ano) em bacias hidrográficas estavam dentro dos 10% dos valores observados (-9,2% do percentual para nitrogênio, 6,6% para fósforo e 5,4% para sedimento).	Tanto o SWAT-regular quanto o Topo SWAT descreveram adequadamente a descarga do lençol frático com precisão diária em <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE). Foi selecionado o Topo SWAT para prever as cargas de nutrientes e sedimentos, o qual representou

Nº	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
4	Amin et al. (2018)	O Topo SWAT usou quatro cenários de criação de gado. O cenário típico também reduziu a carga de nutrientes e sedimentos em comparação com o cenário sem BPM.	Procuraram comparar qualitativamente os resultados de simulação no SWAT a partir de algumas observações de campo.	melhor a vazão do fluxo diário durante a validação. O intuito é aumentar a produtividade no sistema de cultivo e leiteiro sem deteriorar o solo e a água.
5	Baffaut e Benson (2009)	Recarga de aquífero foi calculada com uma função linear pela infiltração diária através do perfil do solo e da lagoa, como córregos perdidos, utilizando a recarga do dia anterior.	Simulou córregos e córregos perdedores, especificamente de altas condutividades do solo nos canais, e as dolinas foram simuladas como lagoas de alta condutividade hidráulica na parte inferior.	Perceberam que os canais principais encaminham o fluxo e os poluentes de uma subbacia para a seguinte.
6	Hou e Gao (2019)	O CN2 de 70% do escoamento total em pomares e florestas subterrâneas é o mais alto em florestas (628mm). Dados observados foram utilizados para verificar o efeito simulado.	Os resultados sugerem que a precipitação média mensal simulada na estação Changqiao Long coincide com os valores medidos relativamente durante o período de calibração, com E_{ns} de 0,82 e R^2 de 0,92.	Utilizaram Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e GWR, com base na fragmentação do uso do solo, para identificar áreas com maior e menor valor agregado, relacionar com uso da terra e com a geração de escoamento na bacia.
7	Jain et al. (2015)	O fluxo de base diário, fluxo e precipitação foram convertidos em percentuais para análise posterior. Foi calculada a média de evapotranspiração anual simulada de Arundo. A calibração <i>step-wise</i> é um procedimento que permite calibrar os diferentes componentes do fluxo conforme os diferentes processos hidrológicos subjacentes a cada objetivo de calibração.	As simulações indicaram que a invasão de Arundo causou aumento significativo na absorção de água e redução do fluxo em comparação com gramíneas, que anteriormente dominavam as nascentes.	O Rio Nueces apresenta-se geomorfologicamente complexo, pois muda rapidamente de curso e os processos subjacentes não são bem compreendidos.
8	Malağò et al. (2016)	Um modelo de fluxo cárstico modificado: reservatório superior e sistema de reservatório inferior.	O modelo captou a hidrologia das áreas cársticas, permitindo uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos sob a escassez.	É uma região que enfrenta um limitado suprimento de água e um aumento na demanda sazonal, especialmente durante o verão para usos agrícolas e turísticos.
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	O GW_DELAY de 31 dias foi reduzido para 7,5 dias para caracterizar o rápido tempo de resposta da topografia cárstica. O CN2 foi usado na simulação de escoamento diário, enquanto o algoritmo de infiltração <i>Green-Amp</i> é usado para a simulação do escoamento subterrâneo.	Os resultados em vários aspectos da modelagem foram consistentes, corroborando com a hipótese da qualidade da água por meio do fator cárstico profundo atuando como diluidor, estendido com a quantificação do cárstico.	O SWAT foi modificado para simular a resposta hidrológica e química de sistemas cársticos e avaliar os impactos da gestão do uso da terra e mudanças climáticas, gerida de forma intensiva.
10	Palanisamy e Workman (2015)	Uma calibração hidrológica mensal prévia, e a validação do modelo foi baseada na história de depósito sedimentar do reservatório de Barasona.	Os componentes do fluxo cárstico foram incorporados no SWAT, chamado KarstSWAT que, foi capaz de reproduzir os hidrogramas observado melhor do que o SWAT em termos de fluxo de pico e volume de hidrograma de nascentes e de correntes.	Os sumidouros localizados no leito foram conceituados como orifícios, e o fluxo através desses orifícios foi modelado como uma função do diâmetro do escoadouro.
11	Palazón e Navas (2014)	O uso do método estatístico W.A., que utilizou um pacote gratuito de software Matlab (WTC-R15), utilizado para construir o XWT a partir de dois CWT.	O KarstSWAT foi capaz de reproduzir os hidrogramas observado melhor do que o SWAT em termos de pico de fluxo e hidrograma de volume.	Dados hidrográficos e radiométricos referentes a taxas de sedimentação USLE K e albedo. Foram utilizados dados dos estudos dos processos. Uma abordagem conjunta de modelagem hidrológica de superfície para entender os componentes do fluxo de base da descarga fluvial em ambientes cársticos.
12	Salerno e Tartari (2009)	O fluxo superficial e do canal é medido usando o tempo estimado de concentração. As previsões das taxas de pico do escoamento ocorreram a partir de uma modificação racional na fórmula.	Simulou a hidrologia, levando em conta a variabilidade espacial dos dados espaciais por meio do SIG.	Minimização do desvio absoluto médio entre vazões observadas e simuladas identificaram valores/intervalos ótimos para cada parâmetro.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Simulação de descargas do sumidouro e dos fluxos dos rios, assim como poluentes, foram medidos diretamente nas concentrações de coliformes fecais.	Os resultados da validação mostram que o método P3 (Probabilidade, Proteção e Precipitação) estima mais de perto a vulnerabilidade do aquífero e o RII (índice de intensidade de risco) minimiza o viés exploratório. Por outro lado, o método COP (de concentração de fluxo em camadas sobrepostas) usa as características cársticas conhecidas subestimando a vulnerabilidade.	O RII não contabiliza todos os recursos cársticos devido a falsos positivos das características cársticas. O método COP-DEM, superestima a vulnerabilidade. O método P3 é adequado para todos os aquíferos cársticos e oferece melhorias em relação a metodologias existentes de mapeamento de vulnerabilidades.
14	Sullivan e Gao (2017)	Utilizaram dados do escoamento, NDVI e sedimento para medir as	O aumento do rendimento de água pode acumular a quantidade de	Aplicaram com sucesso o SWAT para estimar a produção de água e

Nº	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
16	Vale e Holman (2009)	trocas entre os serviços ecossistêmicos. O SWAT foi adequado e utilizado o SWATCUP para o processamento. Simulações revelam que três dos quatro corpos de água ligados perdem água significativa para o aquífero subjacente.	erosão do solo. O rendimento de água e o rendimento de sedimentos em 2000 e 2010 estão em uma relação sinérgica. O balanço hídrico simulado demonstra que a bacia é dominada por evapotranspiração, fluxo superficial do sistema lacustre para o mar e descarga de águas subterrâneas costeiras, sendo com menor importância: evaporação e captação do lago.	solo. No entanto, a precisão variou de acordo com a estação; maior na estação seca e menor na estação chuvosa. A descarga de águas subterrâneas costeiras tem origem tanto no vazamento dos lagos quanto em caminhos de fluxo de águas subterrâneas em larga escala, anteriormente não reconhecidos, no aquífero de calcário.
17	Vigiak et al. (2017)	Após a calibração hidrológica, a erosão bruta da encosta e os rendimentos dos sedimentos foram amplamente calibrados usando dados auxiliares.	A gestão de sedimentos é uma preocupação prévia na bacia do Danúbio para a prestação de serviços econômicos e ambientais.	A erosão de barrancos, os deslizamentos de terra e os processos de erosão de geleiras não puderam ser incluídos.
18	Wang e Brubaker (2014)	O ISWAT não linear teve melhor desempenho na estimativa da vazão, sobretudo durante a recessão do baixo fluxo, com períodos de baixo fluxo. Isso indicou que o algoritmo não linear pode representar melhor o conduto da água subterrânea.	O parâmetro ESTimation (PEST) foi acoplado ao ISWAT para autocalibrar os valores dos parâmetros não lineares. Um total de 10 anos de registro em 15 medidores de fluxo foi usado para calibrar o modelo.	Hidrogramas de ISWAT-L e ISWAT-N foram utilizados. Um período de aquecimento de 2 anos foi aplicado. A abordagem ISWAT-PEST acoplada pode ser usada na simulação de vazão futura.
19	Williams et al. (2014)	O modelo foi parametrizado inicialmente com base nos dados de fluxo contínuo e dos nutrientes. As saídas do modelo foram usadas como entradas para os períodos em que os valores medidos não estão disponíveis.	As concentrações de nutrientes nos fluxos dos tributários que drenam vários usos da terra não foram significativamente diferentes ($\alpha \pm 0,05$, com nível de confiança de 95%) para a maioria dos locais.	Originalmente, o modelo foi parametrizado com base nos dados de fluxo contínuo e nutrientes registrados na área da bacia. O balanço hídrico indicou um tempo de permanência que varia de seis a nove semanas.

Fonte: Os autores (2022)

O SWAT pode ser utilizado para vários tipos de aplicações e em diferentes tipos de terrenos ou ambientes geológicos, envolvendo diversos aspectos físico-naturais e na inclusão das atividades antrópicas, possibilitando assim auxiliar na gestão de recursos naturais. No contexto de Brasil, o estudo de Dantas (2016) investigou o processo hidrossedimentológico na bacia do Rio Taperoá, no Estado da Paraíba, para identificar boas práticas de manejo para uma melhor gestão agrícola.

No contexto de análise de desempenho do modelo, o estudo de Dantas (2016) aponta que, no caso da vazão, também se identificou uma variação significativa em comparação aos dois períodos analisados. No primeiro período, a vazão média registrada no posto fluviométrico era de 6,56m³/s. No segundo período, passou a ser de 3,48m³/s, ou seja, uma diminuição de 53%. O SWAT também seguiu essa tendência e estimou uma vazão média observada para o primeiro período igual a 8,39 m³/s, passando para 3,67m³/s no segundo período. Contudo, o modelo apresentou um ajuste muito bom para o primeiro período NSE (NASH e SUTCLIFFE, 1970), com NSE=0,81 e R²=0,83, e bom para o segundo período (NSE=0,70 e R²=0,70). Também foi visto que, em escala espacial, algumas subbacias passaram a apresentar menores valores de vazão no segundo período em relação ao primeiro período, sendo que as subbacias que compreendem o curso do rio principal, o Rio Taperoá, demonstram as maiores taxas de vazão na bacia em ambos os períodos analisados.

Alguns trabalhos empregaram o modelo SWAT no Cerrado, com destaque para: Lima et al. (2013), Santos (2016) e Simões (2019). Santos (2016) analisou a produção da carga líquida na bacia do Ribeirão do Gama, em Brasília/DF. Lima et al. (2013) desenvolveram uma base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacias do bioma Cerrado. Nos períodos de calibração e validação no SWAT, Santos (2016) empregou referências estatísticas quantitativas, onde os indicadores foram Nash-Sutcliffe (NSE) e R², recomendadas também por Malagò et al. (2016), Amin et al. (2017) e Amin et al. (2018) para avaliar diversos modelos de quantificação sistemática da acurácia em simulações de bacias hidrográficas. Por sua vez, Simões (2019) realizou uma modelagem hidrossedimentológica da bacia do Rio Indaiá, Alto São Francisco/MG, onde utilizou dados do Projeto MapBiomias na categoria de uso da terra, entre outros. O mesmo autor faz alertas em sua pesquisa, pois é necessário considerar a possibilidade de que a classe "Pastagem" esteja superestimada, pois desconfia de que esta classe, muitas vezes, se confunde com a classe "Agricultura" e que a classe de "Culturas Anuais" foi subestimada.

Amatya et al. (2011), Palazón e Navas (2014) e Williams et al. (2014) utilizaram os produtos da topografia e/ou batimetria para execução no modelo, o delineamento das bacias, subbacias, rios, córregos e mudança no armazenamento do RE, computados usando um levantamento batimétrico, onde identificaram os divisores topográficos de contribuição hídrica pelo fornecimento dos dados existentes. Amatya et al. (2011), Palazón e Navas (2014) trabalharam: percolação profunda, escoamento de base (água subterrânea), fluxos perdidos, condutividade saturada e TMDL. Por sua vez, Williams et al. (2014) trabalharam com: fluxo subsuperficial, sumidouros, Coeficiente de Escoamento (ROC); balanço hídrico; fósforo e nitrogênio.

Referente aos ajustes nos dados de chuva e retirada dos picos, Amatya et al. (2011) apresentou hidrogramas dos fluxos mensais previstos principalmente para SL1 e SL2, separados por todos os dados incluídos e os picos excluídos em outubro de 2008, com eventos de alto fluxo. Os fluxos mensais medidos e os previstos para o período de agosto de 2008 a outubro de 2009 na subbacia SL1 obtiveram uma eficiência do modelo NSE e predição R^2 de 0,43 e 0,26, respectivamente, além de um R^2 do ROC anual e sazonal simulado entre 0,04 e 0,14. Os dados medidos foram superiores aos dados medidos entre 0,4 e 0,06, evidenciando uma superestimação do modelo. Contudo, ficaram subestimados na subbacia SL2, com o viés PBIAS e R^2 de 0,37 e -2,55. Amatya et al. (2011) acreditam que o fraco desempenho do modelo na previsão de fluxos mensais nos locais SL1 e SL2 foi provavelmente devido a potenciais caminhos de fluxos através do carste e a interação com os níveis de água do lago a jusante. Isso indica que o modelo SWAT, elaborado principalmente para prever fluxos de águas superficiais, foi incapaz de prever com exatidão as vazões dos fluxos mensais subterrâneos.

Os ROCs previstos, NSE e R^2 variaram entre 0,07 e 0,10 em comparação com o intervalo medido de 0,06 a 0,07 neste local. Os autores acima mencionados concluíram que o modelo subestimou os fluxos durante o aumento dos níveis dos lagos, provavelmente devido à alta condutividade e também a um coeficiente de percolação profundo, representado por um fluxo perdido em águas subterrâneas rasas e profundas. Os resultados indicaram que usar um valor médio medido é tão preciso quanto usar previsões do modelo para o fluxo mensal.

O modelo conseguiu simular com precisão dados de saída da bacia por médias mensais. Os resultados demonstraram a influência substancial das características cársticas no balanço hídrico. O R^2 do ROC medido e previsto variou entre 0,22 e 0,25, indicando uma concordância das previsões com os dados medidos. Remataram que esses valores de ROC são três a quatro vezes maiores que os observados para as subbacias SL1 e SL2 (AMATYA et al., 2011).

Baffaut e Benson (2009) investigaram o desempenho do SWAT, de modelo semi-distribuído, na simulação de sumidouros, córregos perdidos e nascentes, tendo em vista bons resultados na modelagem do fluxo de cargas de poluentes dos riachos, assim como no escoamento superficial, fluxo de retorno do lençol freático e pela infiltração do fluxo de retorno em condutas maiores. O modelo foi calibrado e validado para coliformes fecais e fósforo visando testar a validade das intuições. Quanto aos indicadores de calibração e validação do fluxo, os valores NSE e R^2 , calculados do fluxo mensal nas estações observadas, variaram em torno de 0,24 a 0,56.

Salerno e Tartari (2009) testaram um método de simulação hídrica no carste, usando a W.A. e a variabilidade espacial dos dados de clima, solos, topografia e vegetação para compreender os componentes do fluxo de base da descarga de sumidouros no rio, proveniente dos condutos cársticos, conforme dados do equilíbrio hidrológico, obtido pelo balanço hídrico. Esta categoria de estudo fornece relações úteis na modelagem de chuva-vazão, correlações que acontecem nos atrasos temporais entre precipitação, escoamento e condutividade hidráulica. A aplicação em hidrologia do método W.A. foi útil para entender a descarga de sumidouros e dos fluxos, assim como das relações entre o tempo de circulação das chuvas para as águas subterrâneas e destas para os rios, que variaram conforme as estações e de ano para ano (SALERNO e TARTARI, 2009).

Em Spruill, Workman e Taraba (2000), as nascentes foram estimadas como fontes pontuais. As dolinas foram simuladas como lagoas de alta condutividade hidráulica na parte inferior. Os autores concluíram que as mudanças nos valores do CN_2 na descarga do fluxo nos SWRRB e CREAMS do SWAT, citadas no **Quadro 2.6**, melhoraram o particionamento entre o fluxo de superfície e o de

retorno. Por sua vez, a contribuição do fluxo total de águas subterrâneas é simulada pelo roteamento do componente de armazenamento do aquífero raso para descarga no córrego. Como tinha pouca informação disponível sobre a sensibilidade do modelo para várias entradas, um procedimento de análise/calibração e sensibilidade foi projetado para avaliar parâmetros pensados para influenciar previsões de descarga de fluxo (SPRUILL, WORKMAN e TARABA, 2000).

As sensibilidades dos parâmetros de Spruill, Workman e Taraba (2000) foram determinadas modelando fluxos diários (vazão) por um período de 2 anos. O desvio absoluto médio entre vazões diárias observadas e simuladas foi minimizado, identificando valores/intervalos ótimos para cada parâmetro, para alcançar o R^2 diário para 0,15, idêntico ao valor diário de 1996 de R^2 . Os valores de NSE e R^2 foram -0,04 e 0,19 para 1995 e 1996, respectivamente. O NSE e o R^2 para fluxos totais mensais foram de 0,58 para 1995 e 0,89 para 1996, semelhantes aos valores encontrados na literatura.

A intenção é mostrar no **Quadro 2.6** como os pesquisadores aplicaram o “SWAT na rocha calcária”, para poder identificar a capacidade de simulação do comportamento da carga hidrossedimentar na bacia, assim como compreender os impactos ocasionados no uso e manejo da terra, que influenciam tanto nos riscos de erosão quanto nos processos hidrológicos, em qualidade e quantidade de água, favorecendo na previsão de possíveis alterações que tendem a ocorrer na superfície terrestre.

Quadro 2.6 Síntese dos trabalhos pesquisados sobre SWAT e as adaptações para o relevo cárstico

Nº	REFs.	PROCESSO	MÉTODO
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	H	Aumentaram o código do fluxo de base no SWAT para simular a operação rápida do movimento de recarga do aquífero raso até o armazenamento profundo devido à topografia, para permitir correspondência nas vazões medidas com os fluxos de base simulados. O modelo foi configurado para a avaliação hidrológica e foi calibrado e verificado usando dados de fluxo medidos.
2	Amatya et al. (2011)	H	Teve levantamento batimétrico, extração de dados do LiDAR e dados de curva de nível a jusante do lago. Mapas de uso, da base USGS 1:24.000, no código SWAT e topográficos. Fotografia aérea com resolução de 1m. <i>Database</i> SSURGO em <i>shapfile</i> e a base de dados para o mapa SC-075 de solo. Locaram uma fonte no ponto de subsuperfície e mudaram a estimativa do escoamento de base.
3	Amin et al. (2017)	H, S	Concentrações de sedimentos sazonais, N, P e oxigênio dissolvido no córrego durante 1972-2005 e concentrações sazonais de N-nitrato no córrego durante 1999-2013. Integraram o SWAT ao TOPO-SWAT e utilizaram o SWATCUP na verificação.
4	Amin et al. (2018)	H, S	O modelo Topo-SWAT foi calibrado e validado em relação ao fluxo de vazão observado, e qualidade da água pela USGS. Os dados de culturas foram derivados dos dados de terras agrícolas (CDL) da USDA-NASS. As informações necessárias para desenvolver os cenários foram coletadas do projeto NESARE <i>Dairy Cropping Systems</i> e do <i>Penn State Agronomy Guide</i> , Serviço Nacional de Estatísticas Agrícolas e especialistas em agricultura local. Um processo de calibração em duas etapas foi realizado, dos dados de fluxo limitado, níveis de água subterrânea e níveis do lago.
5	Baffaut e Benson (2009)	H	Dados de solos a partir do banco de dados do Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NTSR) <i>State Geographic</i> (STATSGO). Uso da terra extraído de imagens satélite de 1991 e 1993. Modificaram as equações de recarga das águas profundas, dividindo o fluxo de recarga da umidade do solo para evitar perdas de fluxo. Aumentaram a condutividade hidráulica de sumidouros, que foram simulados como lagoas e perdas de fluxo no SWAT B & B.
6	Hou e Gao (2019)	H	O NDVI foi dividido em três classes: <0.5, 0.5–0.7 e > 0.7. Pesquisaram a maior capacidade de retenção de água do ecossistema florestal conforme característica geológica de infiltração na região, e na combinação das categorias de cobertura e topografia. Observaram a variabilidade espacial do escoamento total superficial/subterrâneo com os métodos de análise do gradiente de regressão local.
7	Jain et al. (2015)	H	A espécie Arundo não existe como uma opção de cultura no banco de dados do SWAT. Valores de parâmetros para cana-de-açúcar foram ajustados para Arundo com base em observações disponíveis no modelo ALMANAC, sobre desenvolvimento da área foliar e produção de matéria seca de Arundo.
8	Malagò et al. (2016)	H, S	Buscaram quantificar o fluxo cárstico incluindo picos e o escoamento de base. Os pontos de nascentes foram calibrados manualmente, já que os sumidouros modificaram a descarga já calibrada (KSWAT), o balanço hídrico e as condições hidrológicas espaciais e temporais foram explicitados na geomorfologia, em particular, a condutividade hidráulica efetiva no canal principal. A região é

Nº	REFs.	PROCESSO	MÉTODO
			dominada pelos calcários e enfrenta um limitado suprimento de água e um aumento na demanda sazonal, especialmente durante o verão, para usos agrícolas e turísticos
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	H	Trabalharam a descarga de aquífero. Alteraram o fluxo de retorno cárstico, perdas de fluxo e dreno dos sumidouros, calculando o RESup e REInf disposto por camadas. O modelo de um RE ligado ao SWAT simulou o comportamento do carste.
10	Palanisamy e Workman (2015)	H	O uso da terra do projeto europeu CLC e modificados os tipos de solo (FAO). Algoritmo de soma roteamento e agregado (SSRA). Calcularam o fluxo para modelagem de sumidouros.
11	Salerno e Tartari (2009)	H	Mapa pedológico (1:50.000), DEM/inclinação, carta litológica extraída da carta geoambiental 1:10.000. Uso, precipitação e temperatura derivou o B.H. Realizaram uma abordagem combinada de modelagem hidrológica superficial e a estatística W.A., para entender a descarga de sumidouros de um rio, descreveram a variabilidade dos fluxos ligados às relações da variabilidade climática para as águas subterrâneas, que variaram conforme as estações e de ano para ano. A W.A. utilizou um pacote gratuito de <i>software Matlab</i> (WTC-R15).
12	Spruill, Workman e Taraba (2000)	H, S	Utilizaram parâmetros de descarga do fluxo na SWRRB + CREAMS do SWAT. Baixaram valores do CN2 para computar a maior infiltração em solos cársticos.
13	Sullivan e Gao (2017)	H	O método P3 é proposto como uma nova metodologia de avaliação de vulnerabilidade cárstica, minimizando o viés exploratório, utilizando a probabilidade e uma árvore de decisão no solo cárstico. Geração de mapas de vulnerabilidade e risco em nitrato. DEM de resolução de 1 m do LiDAR,
14	Tian et al. (2016)	H, S	Integraram o modelo CASA e o SWAT para quantificar os serviços ecossistêmicos.
15	Vale e Holman (2009)	H	Para encaixar/melhorar o ajuste dos limiares de recessão do fluxo satisfatoriamente nos hidrogramas, foi realizada: a) uma redução para 0,020 dias no parâmetro ALPHA_BF. O RCHRG_DP e o GW_REVPAP foram acrescidos para 0,55 nas subbacias calcíferas ao norte e 0,20 respectivamente para cobrir as camadas do solo, particularmente dentro das áreas significativas de floresta úmida.
16	Vigiak et al. (2017)	H, S	A erosão bruta da encosta e os rendimentos dos sedimentos foram calibrados usando dados auxiliares (medições em pequenas parcelas das bacias hidrográficas e mapas de erosão nacionais e europeus).
17	Wang e Brubaker (2014)	H	Propuseram uma modificação não linear do valor de recessão em águas subterrâneas no SWAT (iSWAT) otimizando a recessão e a simulação de baixo fluxo.
18	Williams et al. (2014)	H	Usaram DEM da estação de monitoramento SC DHEC (SC-014). Amostragem do fluxo baseado em Doppler (ISC500 41, Lincoln, NE). Avaliaram cargas poluentes (T.N. e T.P.). Abordaram o balanço hídrico para estimar vazamentos verticais como componente residual do lago Magnólia, utilizando dados batimétricos.

(H) Hidrológico; (S) Sedimentar

Fonte: adaptado de Araújo e Figueiredo (2021, p. 79)

Wang e Brubaker (2014) modelaram a qualidade e a quantidade de água. Compararam dados de fluxo do modelo de reservatório linear (iSWAT-L) com o ISWAT adaptado (iSWAT-N). No SWAT original, o fluxo de água subterrânea é calculado usando um modelo de reservatório linear, com vazão proporcional ao armazenamento. Na versão adaptada, um algoritmo de água subterrânea não linear foi introduzido no modelo original devido às características cársticas. Foi introduzido o parâmetro ESTmation (PEST) no modelo, para autocalibrar os valores dos parâmetros não lineares, resultando em uma melhor estimativa na vazão para a bacia. Neste estudo, os parâmetros das águas subterrâneas foram agrupados apenas pelo tipo de solo.

Referente à análise estatística, R^2 e NSE, Wang e Brubaker (2014) concluem que, no modelo iSWAT-L, os alcances de melhor desempenho foram o 05 e o 06. Em Reach 10, o NSE negativo sugeriu que as previsões do modelo não eram melhores do que a média das observadas. No modelo iSWAT-N, quase todas as estatísticas R^2 e NSE mostraram melhorias nos alcances 08 e 10, respectivamente. Embora algumas diferenças nas estatísticas fossem pequenas, as melhorias ainda eram observáveis.

A Tabela 2.1 mostra o R^2 e o NSE para cada alcance nas duas versões do modelo. Os hidrogramas mostraram melhor estimativa em escoamento de base (fluxo na água subterrânea) e de recessão. Isso indica que o algoritmo da água subterrânea não linear é uma melhor representação do comportamento da água subterrânea.

Tabela 2.1 Estatísticas de comparação de erros médios e adequação para cada alcance em ISWAT-L e ISWAT-N

Alcance n°.	Média obs. (Y)	R ²		NSE		Erro médio (e)		Erro relativo (e=Y)	
		i-L	i-N	i-L	i-N	i-L	i-N	i-L	i-N
01	45,20	0,6354	0,6590	0,5062	0,5185	11,27	9,69	0,25	0,21
04	11,32	0,6155	0,6293	0,5748	0,5859	0,40	0,65	0,04	0,06
05	40,87	0,6881	0,7049	0,6663	0,6845	2,77	1,72	0,07	0,04
06	29,88	0,7143	0,7303	0,6678	0,6779	5,08	4,26	0,17	0,14
07	9,11	0,6619	0,6872	0,3450	0,3504	3,76	3,50	0,41	0,38
10	2,20	0,1979	0,1909	0,0791	0,0647	0,05	0,10	0,02	-0,04
11	7,29	0,5237	0,5175	0,4950	0,4696	0,15	0,09	0,02	-0,01
12	4,43	0,4930	0,4821	0,4546	0,4179	0,39	0,21	0,09	0,05
13	2,91	0,3777	0,3675	0,2755	0,2591	-0,56	0,53	-0,19	-0,18
15	18,19	0,5662	0,5782	0,4471	0,4690	2,82	1,81	0,16	0,10
18	2,26	0,5024	0,4969	0,4524	0,4471	0,36	0,37	0,16	0,16
19	5,60	0,4243	0,4219	0,3447	0,3357	1,05	1,10	0,19	0,20
21	1,09	0,4299	0,4390	0,4072	0,4205	0,10	0,08	0,09	-0,08
22	2,17	0,5589	0,5585	0,5226	0,5303	0,34	0,14	0,16	0,07
24	83,79	0,5450	0,5712	0,4295	0,4578	8,59	4,41	0,10	0,05
Geral	18,52	0,6800	0,6841	0,5045	0,5252	2,50	1,81	0,13	0,10

Fonte: Wang e Brubaker (2014, p. 3.397)

2.5.2 Alguns procedimentos analíticos do modelo no carste

Com as orientações em torno da aplicabilidade do SWAT, buscou-se refletir sobre a finalidade deste modelo no carste e sua importância, além de identificar como os autores mencionados no registro do levantamento da pesquisa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2019) trabalharam os materiais e métodos empregados. Então, foram selecionados alguns estudos e aprofundados de acordo com a temática escolhida.

No **Quadro 2.7**, são apresentados os resultados alcançados com uma prévia da pesquisa, sendo que, para uniformizar a ideia central da discussão, a análise estatística focou principalmente em valores do R² e do NSE, que, no geral, não foram tão elevados.

Quadro 2.7 Resumo dos estudos relevantes em modelagem hidrológica cárstica

Nº	ESTUDO	PALAVRA-CHAVE	CÓDIGO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	RESULTADO-CHAVE
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Gerenciamento de arbustos na provisão de água	GW_DELAY, ALPHA_BF, REVAPMN e RCHRG_DP	NSE=0,09 e -0,4
2	Amatya et al. (2011)	Percolação profunda, fluxos perdidos, TMDL, condutividade saturada	ESCO, SURLAG, SOL_AWC, CH_K1, CH_K2, GW_DELAY, ALPHA_BF, Adição de fonte de ponto de subsuperfície (sumidouro) e modificação do método de estimativa de escoamento de base	NSE=0,29 e -0,91
3	Amin et al. (2017)	Gestão agrícola, qualidade da água, nutriente e sedimento	SURLAG, SOL_AWC, ALPHA_BF, CN2 e, ESCO	NSE=0,77 a 0,79
4	Baffaut e Benson (2009)	Fluxo e transporte de poluentes (coliformes fecais e fósforo), recarga e águas subterrâneas	O fluxo de retorno e a recarga do aquífero: gw_delay, rchrg_seep, rchrg_krst, krst_sleep, krst_delay, dividindo a recarga seca e de água, usando valores de alta condutividade hidráulica	NSE=0,24 e -0,56
5	Hou e Gao (2019)	Geração de escoamento, variação espacial, fatores de impacto	CN2, SOL_AWC, ALPHA_BF, GWQMN, CH_K2	NSE, R ² =acima de 0,64 e 0,78
6	Jain et al. (2015)	Arundo donax, espécies invasivas, aquífero cárstico, balanço hídrico;	CN2, SOL_AWC, ALPHA_BF, GW_DELAY, ESCO, CH_K2, GWQMN	NSE e R ² =0,79 e 0,76

Nº	ESTUDO	PALAVRA-CHAVE	CÓDIGO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	RESULTADO-CHAVE
7	Malagò et al. (2016)	áreas ribeirinhas, cana gigante Balanço hídrico e calibração multi-site	A1 Fração de entrada para o reservatório superior, a2 Fração do reservatório superior para abaixar, ALPHA_BF, ALPHA_BF_D, CH_K (1), CH_K (2), CN2, EPCO, ESCO, GW_DELAY	NSE e R ² =0.53 e 0.46
8	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Processos geoquímicos e hidrológicos, alterações climáticas	K, as constantes de recessão para o reservatório inferior; a2, a fracção de fluxo da descarga de reservatório superior que entra no reservatório inferior; a1, a fração cárstica com o reservatório superior; e K1, a recessão constante para o reservatório superior	NSE=0,62 PBIAS=-22,3
9	Palanisamy e Workman (2015)	Fluxos localizados em sumidouros e riachos, karstSWAT, roteamento de fluxo e recarga	CN2, REVAPMN, ALPHA_BF, GW_DELAY O modelo adaptado para sumidouros que drenam para nascentes. Componentes de luxo, GW_REVAP	NSE=0,57 -0,87
10	Salerno e Tartari (2009)	Componente do fluxo de base e análise W.A.	CN2, K ₂ , LAT_TIME, GW_DELAY	NSE=0.56 e -0.66
11	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Escoamento, qualidade de água	ALPHA_BF, combinações de capacidade de água disponíveis, condutividade hidráulica do canal (Ch_K), comprimento do canal (CL)	NSE e R ² =0.04 e 0.19
12	Tian et al. (2016)	Modelo CASA, erosão do solo, trocas de serviços ecossistêmicos	Utilizaram SWAT e CASA para: escoamento, produção de água e sedimento, relações de compensação e sinérgicas da NPP.	NSE > 0.5 e R ² > 0.6
13	Vale e Holman (2009)	Lagos rasos, balanço hídrico	CN2, ALPHA_BF, RCHRG_DP e GW_REVAP	NSE entre 0,67 e 0,74
14	Vigjak et al. (2017)	Rendimento de sedimentos, concentração de sedimentos suspensos	O procedimento de calibração foi testado e revisado a partir da consulta a literatura, reconsiderando as regras da parametrização	NSE > 0,50
15	Wang e Brubaker (2014)	PEST, algoritmo não linear	ESCO, EPCO, SL_SOIL, CANMX, GW_DELAY	R ² =0.6354 e 0.6590
16	Williams et al. (2014)	Fluxo superficial, sumidouro, ROC, balanço hídrico, fósforo, nitrogênio e TMDL	Avaliaram dados de cargas poluentes T.N. e T. P. e batimetria, O monitoramento incluiu o registro de chuvas, amostragem sazonal da qualidade da água, medições de vazão contínua de diferentes pontos da bacia.	Mais de 50% do T. P. e mais de 70% T.N.

Fonte: Os autores (2022)

Referente à abordagem analítica dos dados da RSL, foram utilizados como base os modelos que expõem como os autores anteriormente citados: a) resolveram questões de análise III, da Etapa 2 da pesquisa (**Quadro 2.1**); b) realizaram as etapas de processamento e simulações; c) análise estatística; e d) saída dos dados.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compreender os padrões preexistentes que incluem os diferentes métodos, tecnologias e aplicações norteadoras integradas envolvendo os termos “SWAT” e “Karst” é algo de suma importância atualmente, pois as possibilidades de diferentes aplicações nas mais variadas áreas de conhecimento permitem o desenvolvimento de projetos que favorecem o manejo sustentável do solo, assim como uma melhor qualidade de vida das pessoas. Com o registro do levantamento feito na plataforma *Web of Science*, portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (BRASIL, 2021), pode-se observar um crescimento em quantidade e qualidade do número de pesquisas. As diversas aplicações possíveis nas várias áreas de conhecimento permitem o desenvolvimento de projetos por práticas inteligentes, envolvendo modelagens hidrológicas, assim como mensurações sistemáticas.

A RSL favoreceu explicitar como outros países estão implementando seus estudos nesta área do conhecimento, voltadas as principais aplicações, técnicas utilizadas, integração dos dados, métodos

de análises, bem como identificação de lacunas na pesquisa e o desempenho da modelagem dos processos hidrológicos e sedimentares no carste. A estrutura da RSL narrativa focou nas contribuições, métodos aplicados e resultados alcançados para o uso do SWAT no relevo cárstico, até quando estes não foram tão satisfatórios assim, demonstrando que a aceitabilidade do modelamento final é passível de maleabilidade. Diante dos fatos expostos, as ideias foram esquematizadas nos dados de entrada, processamento e de saída.

Neste artigo, foi exposta uma investigação parcial de 19 trabalhos divulgados na pesquisa *Web of Science* (BRASIL, 2019) entre 2000 e 2019 que foram mais significativos, evitando assim redundâncias com a inclusão de outros. No contexto dos critérios adotados na seleção dos estudos internacionais, focou-se no resultado satisfatório da modelagem. As técnicas de sensoriamento remoto resultaram na produção de mapas ambientais para detecção da sensibilidade dos parâmetros e de variáveis, com vistas à concepção da modelagem.

A definição do ciclo hidrológico ocorreu após a inserção dos principais dados de entrada no modelo: solos, cobertura do solo, mais a declividade gerada pelo DEM no SWAT, obtendo assim a HRU. Ainda referente à coleta dos dados, as novas tecnologias avançam com a aplicação de dados batimétricos, radiométricos e do “doppler” para detecção de cotas do aquífero. Após adição dos dados das estações climatológicas e/ou fluviométricas, foram escolhidos parâmetros e variáveis mais influentes para a simulação do fluxo, que controlam processos hidrológicos superficiais e subterrâneos.

As informações das estações meteorológicas, climatológicas e/ou fluviométricas ajudaram a entender o comportamento do volume de água e sedimento no decorrer dos anos nas bacias hidrográficas. A representação de algumas variáveis do balanço hídrico bastante utilizada pelos autores aconteceu através de hidrogramas e histogramas.

A aplicação do SWAT nos sistemas cársticos em trabalhos futuros deverá ser precedida de informações fisiográficas da área, que são a base para estabelecer parâmetros e variáveis mais apropriadas e sensíveis no modelo. A criação de cenários também é um importante produto que, dependendo do objetivo, pode muito bem ser empregada no SWAT para o carste. Os novos algoritmos com base na evolução das equações calculam os eventos mais influentes para estimar valores, visando o planejamento, bem como auxiliar na tomada de decisão.

Apesar do volume de dados, muitos destes estudos contribuíram realizando ajustes nas equações e no modelo para aplicação na feição cárstica. A uniformização das escalas, *Datum* e sistema de coordenadas no ambiente SIG, referentes aos dados de entrada, é necessária para o funcionamento do modelo. Os autores recomendam esclarecer dúvidas na literatura, bem como acesso a *sites* institucionais públicos, para adquirir os dados e conseguir apoio no manuseio pelos desenvolvedores do modelo.

Trata-se de um tema relevante para o curso de Geografia, em especial para as questões ambientais ligadas à compreensão da fisiologia das paisagens cársticas. A principal contribuição deste artigo é a revisão de literatura e das aplicações do SWAT no ambiente cárstico em língua portuguesa. A conquista da integração desses dois termos, geotecnologia e feição ambiental têm um impacto significativo nos estudos relacionados aos processos hidrossedimentológicos no relevo cárstico, assim como às disciplinas das áreas concernentes à agronomia, engenharia civil, ambiental, hidrologia, geologia, pedologia, geografia, entre outras.

No entanto, como o SWAT foi desenvolvido originalmente para diferentes propósitos, vários desafios estão sendo encontrados para a integração e a aplicação na feição carste. O presente trabalho traz um balanço das atividades desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade de Brasília (UnB) no último triênio.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

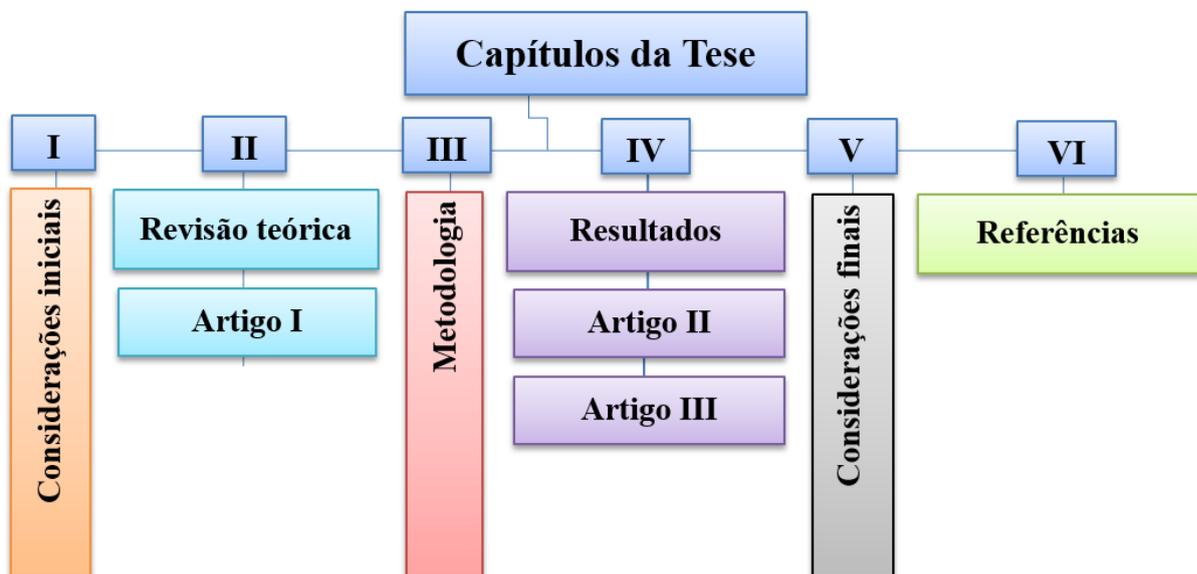
3.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para organização dos dados e informações coletadas durante a pesquisa, a representação dos temas envolvidos aos materiais e etapas da pesquisa, a representação de díspares temas, que foram estruturados de acordo com os aspectos físicos do relevo, as etapas para confecção do modelo, identificação dos métodos de simulação para detecção dos impactos antrópicos sob a hidrologia, para correlacionar espacialmente por meio do relevo e da vegetação. Discute-se também sobre os passos seguidos para alcançar os objetivos determinados para conhecimento do modelo hidrológico da bacia.

3.2 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está subdividido em seis capítulos, conforme **Figura 3.1**.

Figura 3.1 Diagrama da Estrutura Organizacional da Tese



Fonte: A autora (2022)

Apresenta-se no Capítulo 01, das **CONSIDERAÇÕES INICIAIS**, realizou-se uma explanação sobre o que se trata a tese, a que se destina o estudo, a definição do contexto atual, a problemática geral da pesquisa, as hipóteses, a justificativa, a estrutura geral da tese e os seus objetivos.

É apresentado no Capítulo 02, o artigo científico da revisão bibliográfica (**ARTIGO I**), trata-se do manuscrito aceito e publicado na Revista Caminhos da Geografia ligada à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde discutiu-se sobre os principais aspectos relacionados à aplicação do modelo SWAT, o estado da arte no relevo cárstico, o *status* atual do conhecimento ligados ao desenvolvimento do tema, as técnicas de modelagens e a potencialidade na estimativa de parâmetros e variáveis.

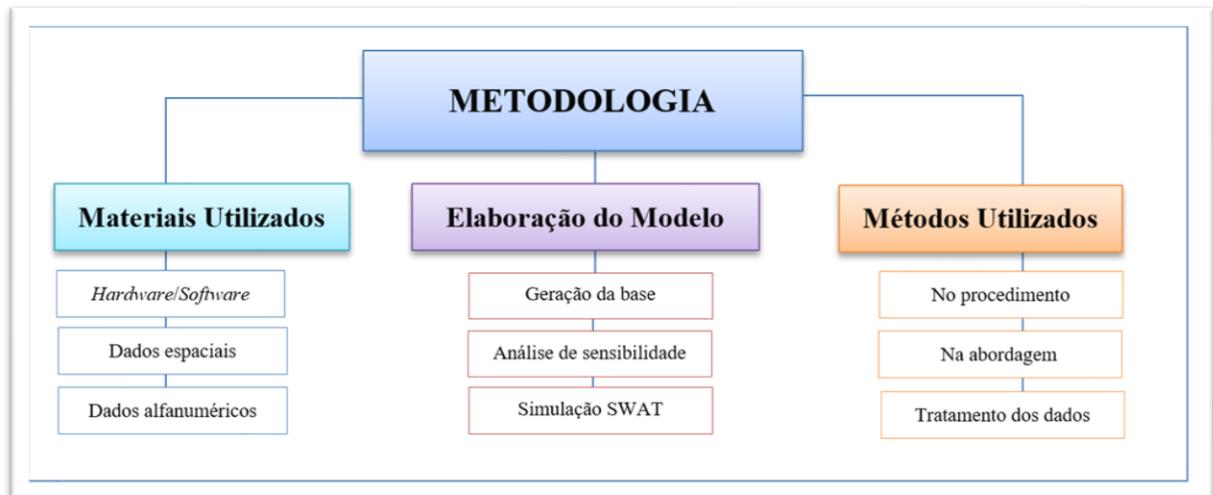
Descreve-se no Capítulo 03, os **MATERIAIS E MÉTODOS**, a estrutura organizacional da tese, a metodologia utilizada para organização dos dados e das informações coletadas, a representação dos diferentes temas envolvidos e as etapas da pesquisa.

No Capítulo 04 figura a estrutura organizacional da apresentação dos **RESULTADOS** alcançados da tese, evidenciando como ocorreu a explanação dos diferentes temas envolvidos nas diversas etapas da pesquisa e os produtos obtidos. No segundo artigo científico, intitulado '*Impactos na mudança de uso e cobertura do solo sob uma hidrologia com feição cárstica (Nordeste Goiano - Brasil)*', submetido à Revista Portuguesa de Geografia - Finisterra - foram quantificadas as tendências temporais das alterações detectadas durante o período de simulação, referentes à geração de escoamento, onde foi identificado o padrão espacial do escoamento da bacia a partir da correlação entre fatores ambientais e os impactos ocasionados pelo homem, frente às mudanças de LULC e da topografia da bacia. E no terceiro artigo científico submetido à Revista Sociedade e Natureza da UFU, identificou por meio de simulação, os impactos antrópicos decorrentes das mudanças de LULC no padrão da geração de escoamento na bacia, a partir de uma correlação espacial à partir da utilização da variação espacial entre o relevo e a vegetação. O estudo de caso mostrou alguns aspectos relacionados à aplicação do modelo SWAT e das técnicas de modelagem.

Traz-se no penúltimo Capítulo, as **CONSIDERAÇÕES FINAIS, RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES** onde expomos as principais considerações e algumas sugestões para a sua continuidade da pesquisa e no último Capítulo, trata das **REFERÊNCIAS** utilizadas durante a elaboração da pesquisa.

As etapas metodológicas desenvolvidas nesta pesquisa são apresentadas na **Figura 3.2**.

Figura 3.2 Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: A autora (2022)

- **Materiais utilizados** - apresenta os materiais utilizados, como o sistema computacional(*software/hardware*), os dados necessários para realizar a modelagem, passos necessários para elaboração e tratamento das imagens orbitais assim como, cálculos para obtenção da correlação entre escoamento e mudanças de LULC.
- **Elaboração do modelo** - apresenta as formas de obtenção dos dados de entrada e a definição dos parâmetros para os dados utilizados na modelagem hidrológica.
- **Métodos utilizados** - aborda todas as etapas da modelagem do *runoff* realizado no estudo, apresentando os principais procedimentos adotados, a abordagem e o tratamento dos dados assim como, cálculos para obtenção da correlação entre escoamento e mudanças de LULC, necessários para realizar a pesquisa.

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

3.3.1 Sistema Computacional

Os principais programas (*softwares*) utilizados no presente trabalho para a realização das etapas relacionadas à modelagem na bacia foram:

- Análise espacial e geração de mapas: *ArcGISDesktop* versão 10.5.1 com a extensão *Spatial Analyst* desenvolvido pela ESRI®, Redlands, CA USA;
- Extensão *ArcGIS* COM OS MÓDULOS SWAT, *ArcSWAT*: versão 2012.10_5.24 in: SWAT (2022);
- Análise de sensibilidade, calibração, validação e incerteza, SWATCUP 2012: versão

5.1.6.2. *Copyright*© Eawag 2013 obtido no sítio eletrônico do SWAT;

- Leitura da saída do modelo de um projeto SWAT, visando identificar problemas potenciais no modelo, *SWATCheck* 1.2.0.10, 6 nov. 2018 *in*: SWAT;
- *SWAT Output Viewer* foi desenvolvido para visualizar e analisar rapidamente os resultados no modelo, *in*: SWAT;
- *Software* Hidro_Build 1.4.0.83, para obtenção das médias mensais dos eventos de precipitação obtido na: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA);
- *PcpSTAT*: versão 2003 para cálculos de parâmetros estatísticos de chuva, *in*: Soil & Water Assessment Tool (SWAT);
- Tabulação dos dados alfanuméricos e dos gráficos, *Microsoft Excel*© 2010: versão 14.0.4760.1000 (64 bits);
- *Software* estatístico JAMOVI referente a matriz de correlação de Pearson (THE JAMOVI, 2022).

3.3.2 Dados de entrada no SWAT

O **Quadro 3.1** indica os dados utilizados na configuração do modelo no relevo cárstico da porção alta bacia do Rio Corrente.

Quadro 3.1 Etapas da abordagem analítica usados na modelagem, contendo dados espaciais e alfanuméricos

Nº	DADOS	FONTE	FORMATO	RESOLUÇÃO	PERÍODO	SITE
1	Digital Elevation Model (DEM)	EarthData (NASA), ALOS PALSAR (2020), USGS (United States Geological Survey)	Raster	12,5 M	2011	a) USGS; EARTHDATA, Alaska
2	Mapa de Cobertura da terra	LANDSAT 5 e 8, Mapbiomas (2022)	Raster	1:100.000	1985 e 2019	b) USGS, MapBiomas
3	Parâmetros da Cobertura da terra	Ferrigo (2014), Santos (2016), Simões (2019)	Alfanumérico	Reanálise das características de uso e cobertura da terra	-	-
4	Mapa de Solos	IBGE (2022)	Vetor convertido p/ Raster	1:250.000	2019	c) INDE
5	Parâmetros do Solo	Lima et al. (2013), Ferrigo (2014), Santos (2016), Simões (2019)	Alfanumérico	1:5.000.000 Reanálise das propriedades físico-químicas do solo	1998	
6	Dados Plúvio-Fluviométricos	ANA (2022)	Alfanumérico	Reanálise do sistema de previsão do clima e vazão	1980 a 2020	d) Hidroweb no Portal da ANA
7	Dados Meteorológicos	AGRITEMPO (2022)		Reanálise do sistema de previsão pluviométrico	1980 a 2020	e) Geoportail Agritempo
8		SWAT (2022)	Alfanumérico		1980 a 2014	f) Updated Global Weather Data
9		INMET (2022)			1980 a 2020	g) Portal do INMET

(a) <https://earthexplorer.usgs.gov/>; <https://www.asf.alaska.edu>, <https://earthdata.nasa.gov/>

(b) <http://mapbiomas.br>

(c) <https://inde.gov.br>

(d) <http://mapas-hidro.ana.gov.br/>

(e) <http://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estacao/index.jsp?siglaUF=GO>

(f) <https://globalweather.tamu.edu/request/view/39476>

(g) <http://www.inmet.gov.br/portal/>

Fonte: A autora (2022)

Quadro 3.2 Resumo das informações técnicas dos dados alfanuméricos para a ABRC

Nº	LAYER	DESCRIÇÃO	PERÍODO	FONTE
1	Dados climáticos	Dados diários de chuva, temperatura máxima/mínima do ar (°C), insolação (h) velocidade média do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%), de 6 (seis) estações climatológicas: Estação 3420 - Alvorada do Norte Estação 3421 - Alvorada do Norte Estação 0164 - Posse Estação 3506 - Posse Estação 3507 - Posse Estação 3337 – Sítio Base de dados Global Weather Data (CSFR)	1980 a 2020	AGRITEMPO (2022) SWAT (2022)
2	Dados de vazão	Dados diários de vazão (m³/s) da estação fluviométrica Alvorada do Norte convertidas para mensal	1980 a 2020	ANA (2022)
3	Parâmetros do solo	Propriedade física e química do solo: granulometria, profundidade, densidade, condutividade hidráulica etc., dos perfis de cada classe de solo da ABRC	-	Ferrigo (2014), Lima et al. (2013), Santos (2016), Simões (2019)
4	Parâmetros de uso e cobertura do solo	Características de uso, cobertura, vegetação, crescimento vegetal, índice foliar etc., de cada classe de uso do solo da bacia	-	Ferrigo (2014), Santos (2016), Simões (2019)

Fonte: A autora (2022)

3.4 ELABORAÇÃO DO MODELO SWAT

O processo de modelagem na ABRC iniciou-se com a construção da base de dados (espaciais e alfanuméricos) de entrada no *default* do SWAT. Em seguida estes dados foram inseridos na interface *ArcSWAT* do modelo SWAT2012 e acoplado no *ArcGIS Desktop* da ESRI®, para realizar a simulação em escala mensal das variáveis de interesse (*runoff*).

O modelo SWAT exige uma heterogeneidade de informações para ser implementado, sendo imprescindível dados de entrada ligada às características físicas da bacia para que o SWAT possa distinguir e simular: a vazão, ciclo hidrológico, método CN, SURq, GWq, ET, rendimento de sedimentos (NEITSCH et al., 2011).

Após a simulação inicial, procedeu-se no SWATCUP as etapas de análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e verificação do modelo.

Das fases da investigação, os métodos de procedimentos são mais concretos que o método de abordagem. A proposta metodológica (**Figura 3.3**) exposta neste trabalho foi repartida nos tópicos: a) dados de entrada, b) simulação do fluxo e c) prognóstico.

Onde:

- a) Dados de entrada, que contém dados dos parâmetros físicos (DEM, mapa de cobertura vegetal, tipos de solo) e das variáveis climáticas, onde alguns dados são inseridos utilizando o *default* do SWAT; conforme a necessidade do projeto. Dados de Ottobacias são pertinentes à distribuição do fluxo na bacia.

Figura 3.3 Etapas na aplicação do SWAT inclusive na porção do relevo cárstico



Fonte: A autora (2022)

- b) Simulação do fluxo engloba o processamento do modelo, constituindo no aquecimento, calibração e validação (SWATCUP); simulações por etapas e análise estatística, tendo relação direta com a qualidade e tratamento dos atributos dos parâmetros. Do produto da simulação foi gerado o modelo do escoamento para a bacia em dois períodos (1985 e 2019).

Alusivo à simulação proposta, subdivide-se em duas etapas, para comparação dos dados observados com os simulados e a representação do *runoff* na bacia, propiciando correlacionar os dados de cobertura da terra com os impactos gerados pelas atividades antrópicas.

- c) Prognóstico, consiste no pós-processamento, com as saídas do modelo.

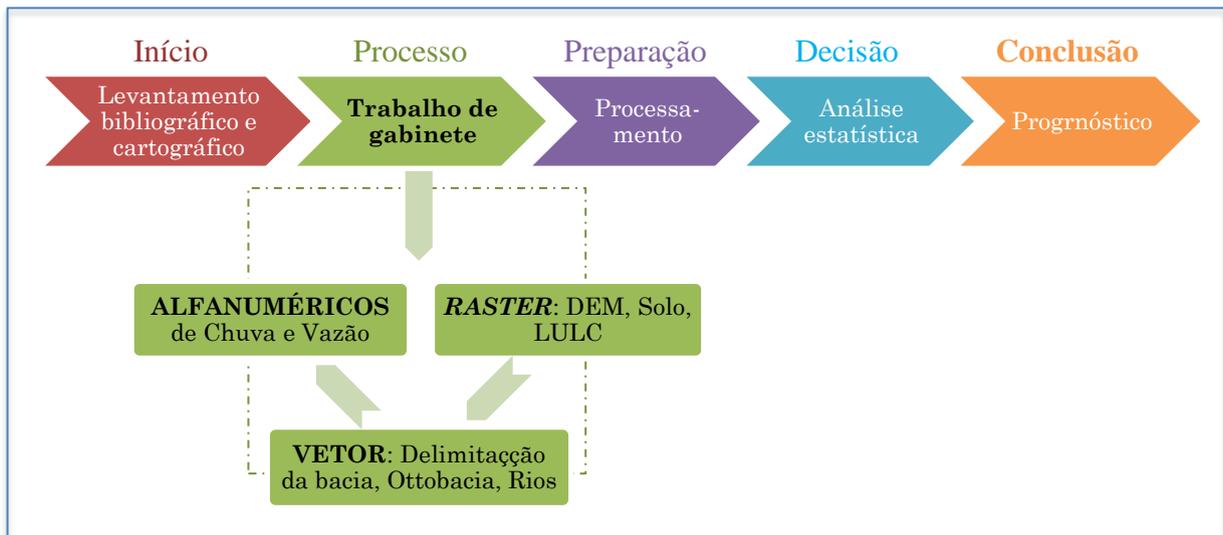
No modelo já existe uma base de dados (*default*) pertencentes aos parâmetros de solo e cobertura vegetal de bacias hidrográficas norte americanas que, na sua grande maioria, não se encaixam nas nossas realidades. De regra, os dados com maior nível de detalhamento são insuficientes, confusos ou de difícil acesso no nosso país.

3.5 MÉTODOS UTILIZADOS

3.5.1 Métodos de procedimentos

A fases teórico-metodológicas da pesquisa versam sobre os passos seguidos para explicar as estratégias utilizadas para elucidar os procedimentos, já que o modelo comporta uma gama imensa de informações. Envolveu como um todo, cinco etapas principais, do início à conclusão do estudo, com desmembramento das três fases necessárias combinado ao processo de gabinete como, a rasterização das imagens, a vetorização dos mapas, a tabulação dos dados, conforme é ilustrado no fluxograma na **Figura 3.4** e **Quadro 3.3**.

Figura 3.4 Roteiro metodológico simplificado das etapas da pesquisa



Fonte: adaptado de Araújo et al. (2004)

Quadro 3.3 Resumo das fases teórico-metodológicas da pesquisa

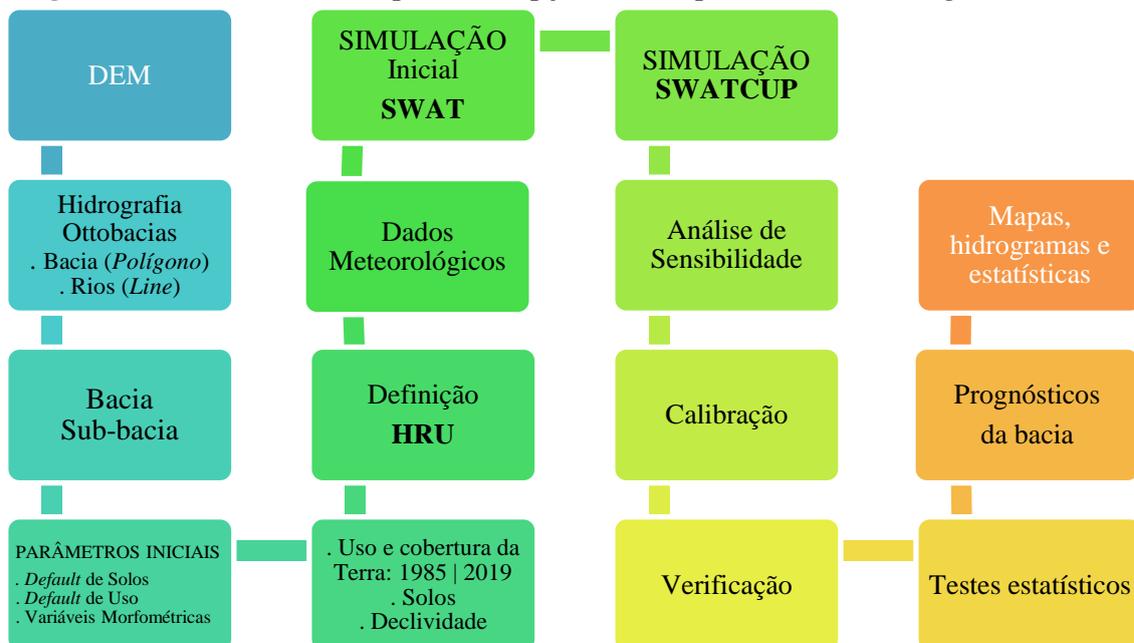
Nº	ETAPAS	DESCRIÇÃO
1	Levantamento Bibliográfico e Cartográfico (Início)	Com realização de uma RSL, investigou materiais publicados, sobretudo, em periódicos de revistas científicas estrangeiras e nacionais, com levantamento dos principais referenciais teóricos e metodológicos; com aquisição da base de dados cartográficos para <i>input</i> no modelo nos órgãos públicos oficiais, tais como: ANA, CPRM, EMBRAPA, IBAMA, IBGE, ICMBio, INMET, INPE, MMA, MapBiomas, NASA, SIEG, USGS, prefeituras municipais, dentre outros.
2	Atividade de Gabinete (Processo)	Consistiu nos ajustes dos parâmetros/variáveis da bacia, subdivididas no manuseio dos dados de sensoriamento remoto e meteorológicos, para inserção dos dados no SWAT, tais como: rasterização das imagens, vetorização dos mapas e tabulação dos dados alfanuméricos, obtendo ajustes sólidos até o início da próxima etapa.
3	Processamento (Preparação)	Abrange a simulação que envolve o período de aquecimento, calibração e validação do modelo, adjacente à análise de sensibilidade, para realização das devidas análises referente ao comportamento do padrão da geração do escoamento no SWAT na bacia.

Nº	ETAPAS	DESCRIÇÃO
4	Análise Estatística (Decisão)	Nesta etapa são realizadas as análises do modelo correlacionando os fatores ambientais e antrópicos sob a hidrologia e topografia, visando investigar o que o SWAT prediz do sistema nesta fração da bacia com presença em partes, de ambiente cárstico, durante o período de calibração e validação da modelagem.
5	Prognóstico (Conclusão)	Para saber, entre outros, se o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente o comportamento do fluxo.

Fonte: A autora (2022)

De forma simplificada, apresentou-se os passos referente aos procedimentos executados no modelo, um refere-se à aplicação do ArcSWAT (A **Figura 3.5**), e o outro, aos passos sequenciados do *mesmo*, os *menus* e as opções acessadas, os insumos necessários para obtenção do modelo padrão do fluxo da bacia (**Figura 3.6**).

Figura 3.5 Passos no SWAT para concepção do comportamento hidrológico da ABRC



Fonte: adaptado de Neitsch et al. (2011)

A **Figura 3.5** esboça como se processa o roteiro metodológico no SWAT para inserção dos dados e interpretação do comportamento do escoamento. Deste modo, a **Figura 3.6** resume o roteiro metodológico para a simulação e a **Figura 3.5** o procedimento utilizado na ferramenta ArcSWAT para a realização da pesquisa.

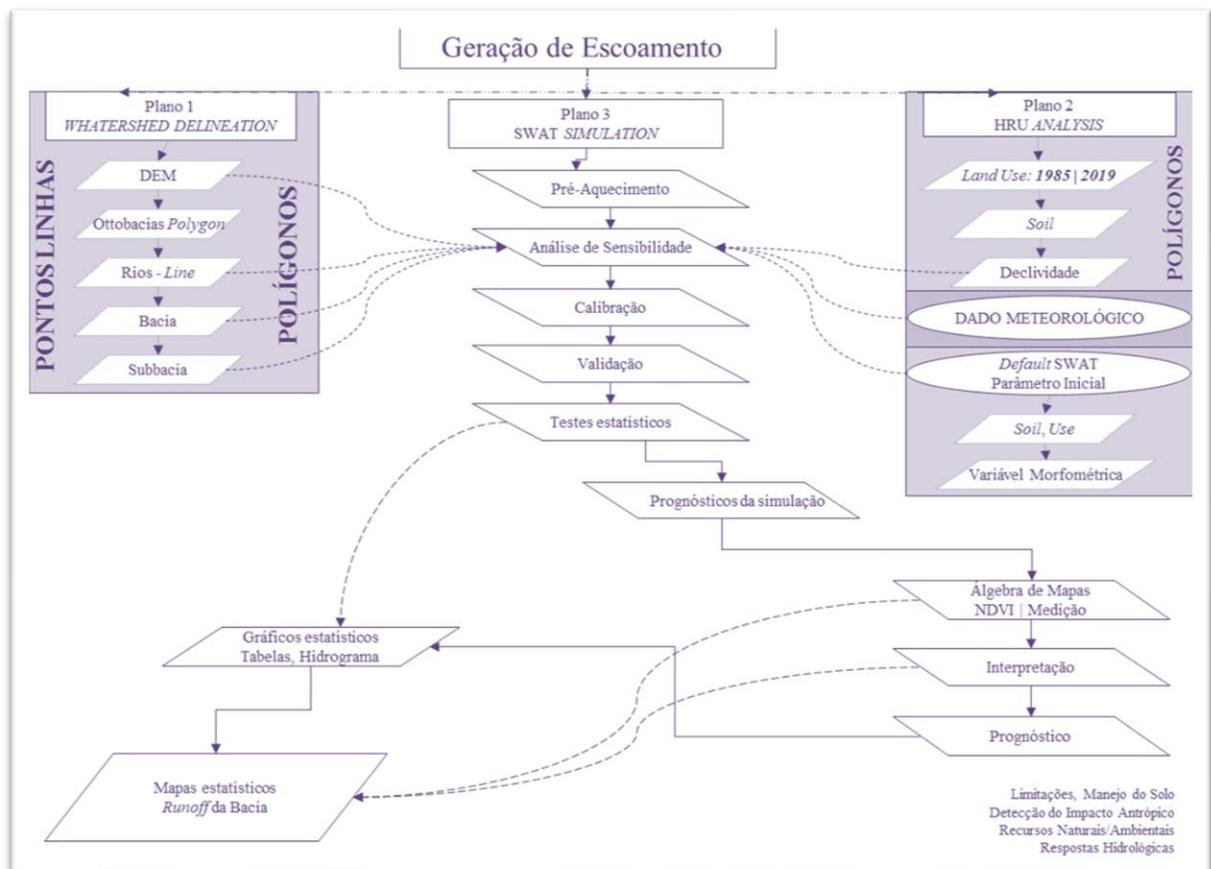
Os menus do ArcSWAT foram alinhados aos Plano 1, 2 e 3. Entretanto, o Plano 2, uniu ainda, a base climatológica e a parte da *database* que fica no *default* do SWAT.

Por fim, no Plano 3, foi executado as simulações, as calibrações, as validações e a análise estatística dos Planos 1 e 2. Como os modelos conceituais/empíricos, são o mais

simples da categoria, nele são realizados os cálculos entre as séries multitemporais de entrada e saída procedidas sem referência às leis físicas, especialmente adequados para aquíferos cárstico, pois não pedem dados sobre a estrutura interna de um aquífero (SALERNO; TARTARI, 2009). É limitado, tendo em vista que as simulações foram realizadas em duas etapas (1985 e 2019) para comparação, tendo como as principais variáveis de representação do fluxo: o DEM, dados meteorológicos, percentual de supressão na HRU e as iterações com as combinações.

O inter-relacionamento das informações (*layers*) permite integrar em ambiente SIG as informações espaciais multitemporais obtendo as respostas hidrológicas relacionadas aos impactos antrópicos, permitindo que se realizem os prognósticos da bacia.

Figura 3.6 Arcabouço conceitual das rotinas executadas no ArcSWAT



Fonte: A autora (2022)

3.5.2 Métodos de abordagem

A princípio, a metodologia aplicada no presente trabalho foi à pesquisa indutiva, partindo-se da identificação das peculiaridades para ponderação da totalidade, por meio da analogia e da aproximação com o problema numa perspectiva histórica, objetivando torná-lo mais explícito e também para construir as hipóteses. A partir da experimentação identificam-se as causas, os efeitos, os fenômenos da realidade, comparando e classificando os dados obtidos, através dos métodos estatísticos de base concreta e segura das informações analisadas, para obter um entendimento do universo dos dados coletados e proporcionar maior familiaridade com o problema, para o entendimento genérico, erguer teses de forma racional e flexível, favorecendo as discussões e as considerações.

Deste modo, ao investigar a temática em questão, reportou-se a autores que se dedicam em seus trabalhos na discussão sobre as questões ambientais vistas sob ótica da Teoria Geral dos Sistemas, para o entendimento das questões ambientais que envolvem a modelagem do fluxo e a dinâmica natural da bacia.

O embasamento metodológico científico que forneceu sustentação aos propósitos da pesquisa conforme é resumido no **Quadro 3.4**, apoiou-se nas obras de Bertrand (1972), Christofolletti (1999), Gomes (1996), Sotchava (1977) e Tricart (1977).

Quadro 3.4 Delineamento básico das abordagens a partir do enfoque temático na pesquisa

Nº	ABORDAGEM	ENFORQUE DA PESQUISA
1	Categoria de análise geográfica	No tocante, são cogitados no discurso, os conceitos de análise geográfica nas diversas categorias, <i>e.g.</i> : espaço, paisagem, lugar, todos em seu momento, porém o conceito de Região é à categoria que mais se adequa. Refere-se a uma porção superficial com uma característica marcante, uma combinação da diversidade, confere-se uma individualidade particular da região, sua identidade, personalidade, aquele ajuste de fenômenos naturais e humanos que são únicos.
2	Sistêmica da paisagem	Busca coletar e correlacionar dados de forma, natureza e interação seus componentes dinâmicos, os quais temporalmente apresentam modificações espaciais, resultado de um jogo de combinações naturais e interferências antrópicas que se processam sobre o 'estrato geográfico'. Desta forma, parte-se do princípio de que as paisagens são formadas por componentes interdependentes tais como: relevo, clima, cobertura vegetal, solo, litologia, arranjo estrutural e que a variação em um destes componentes resultará em transformações para os demais, convém destacar que a compreensão da paisagem só é possível quando vista em sua totalidade, advindo dos conceitos de ecossistema e geossistema formulados por estudiosos no assunto.
3	O ambiente natural e artificial	Bertrand (1972) analisa que o conceito de paisagem está conexo a tudo que os sentidos humanos podem perceber e alcançar da realidade de determinada porção do espaço geográfico ou parte dele. Essa porção é composta por elementos físicos, biológicos e antrópicos, tornando a paisagem indissociável, em constante evolução, estando relacionado à sensibilidade do observador. É só o exterior o que a sensibilidade consegue capturar.

Nº	ABORDAGEM	ENFORQUE DA PESQUISA
		A paisagem pode ser natural, que representa o que não foi transformado pelo homem; ou artificial, também chamada de cultural ou humanizada (GOMES, 1996). Se as ações humanas empreendidas sobre as paisagens causam modificações, seus efeitos negativos também podem ser minimizados (RIGHETTO, 1998).

Fonte: A autora (2022)

3.5.3 Organização e tratamento dos dados

3.5.3.1 Correlação do *runoff*

Para a correlação dos fatores ambientais e antrópicos com os diversos indicadores da geração de escoamento na bacia estudada, foi utilizado a correlação linear de Pearson. Conforme Santos (2007) o teste de correlação de Pearson é indicado quando se procura verificar a relação entre várias variáveis quantitativas ou numéricas que obedecem a parâmetros normais de distribuição, a fim de se obterem os valores de P e de R, onde o P é um indicativo que informa se as variáveis cruzadas têm significância estatística ou não.

O R é o coeficiente de correlação que mensura o quão forte são as variáveis quantitativas avaliadas (THE JAMOVI, 2022). As variáveis permutam de -1, 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 0 a correlação é quantitativamente fraca e nos extremos é mais forte (SANTOS, 2007).

Os casos podem variar quando as variáveis estão positivamente (ou diretamente) correlacionadas. No limite, isto é, se a correlação for ‘perfeita’ - como é o caso se considerar a correlação da variável x consigo própria - o coeficiente de correlação será igual a 1. o mesmo se aplica quando as variáveis estão negativamente (ou inversamente) correlacionadas.

3.5.3.2 Tratamento das imagens

A partir de *Landsat Collections* (da *United States Geological Survey* - USGS) foi obtida a fórmula geral para calcular o valor de refletância da imagem LANDSAT 5 e 8 para tratamento dos produtos orbitais utilizados na pesquisa.

Os dados de radiância espectral OLI também podem ser convertidos em uma refletância planetária usando o coeficiente de reescalonamento de refletância, fornecido no arquivo de metadados do OLI. 8. A **Equação (1)** é usada para converter o valor DN em refletância TOA para a imagem OLI:

$$\rho\lambda' = M\rho * Qcal + A\rho \quad (1)$$

onde,

$\rho\lambda'$ = Refletância planetária TOA, sem correção do ângulo solar. Note que $\rho\lambda'$ não contém correção para o ângulo solar.

$M\rho$ = representa o fator de reescalonamento multiplicativo específico da banda dos metadados, refletância multi-banda X onde X é o número da banda.

$Qcal$ é quantizado e calibrado padrão produz valor de *pixel* (DN).

$A\rho$ = representa o fator de reescalonamento aditivo específico para a mão dos metadados de refletância, adiciona a banda X onde X é o número da banda.

Utiliza-se a fórmula geral para corrigir o valor da refletância com o ângulo do sol, apresentado na **Equação (2)**:

$$\rho\lambda = \rho\lambda' / \cos \theta SZ = \rho\lambda' / \sin \theta SE \quad (2)$$

onde,

$\rho\lambda$ = Refletância planetária TOA

θSE = Ângulo de elevação do local do sol. O ângulo de elevação do sol no centro da cena em graus é fornecido nos metadados (Elevação do Sol)

θSZ = Ângulo zenit do local do sol; $\theta SZ = 90^\circ - \theta SE$

Após os devidos tratamentos, foram realizados os cálculos dos produtos MapBiomas (2022) de uso da terra de toda a ABRC. Para validação, foi escolhido o produto do ano de 2013, por constituir as mesmas bases do produto validado no BRASIL (2015). Foram realizados os cálculos das áreas para comparação dos valores em planilha do MSExcel, multiplicando o valor das áreas pelo valor do *pixel*: $0,003 \times 0,3 = 0,0009$, onde o produto resultou no valor do *pixel* em km^2 , ou seja, $0,0009 \text{ km}^2$.

Para a obtenção do percentual dos valores do pixel, o *Count* da tabela, foi dividido pelo total do *Count* x 100. Já está computado de forma automática no *Count* do MapBiomas (2022) o valor de cada pixel. Em seguida, foram gerados os gráficos para a visualização do comportamento das classes por ano e área (km^2). A conversão de *raster* para vetor se deu pela ferramenta de geoprocessamento na plataforma ArcGISDesktop, por meio da caixa de ferramentas do sistema \conversion tools.tbx\to raster\To raster for polygon.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 APRESENTAÇÃO

Neste Capítulo é apresentado os resultados da pesquisa que analisou o impacto das mudanças de LULC sob os componentes hidrológicos na bacia, em clima de restauração ecológica e de degradação, principalmente nas áreas das cavernas da região, sob os gradientes do relevo, a partir do uso de técnicas de sensoriamento remoto.

Trata-se dos artigos 2 e 3 submetidos às Revistas: a) Finisterra e b) Sociedade e Natureza da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - os quais apresentaram os parâmetros mais relevantes e significativos durante à etapa de simulação do processo do ciclo hidrológico, tendências temporais das alterações detectadas para a bacia, pertinentes ao emprego de técnicas de sensoriamento remoto e do tratamento dos dados meteorológicos disponibilizados nos portais das instituições governamentais.

Na **Figura 4.1** é apresentado entre outros, os resultados obtidos durante a pesquisa.

Figura 4.1 Estrutura organizacional dos resultados da pesquisa

ARTIGO 2	ARTIGO 3
IMPACTOS NA MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO SOB UMA HIDROLOGIA COM FEIÇÃO CÁRSTICA (NORDESTE GOIANO – BRASIL)	DESAFIOS NA CORRELAÇÃO ENTRE OS FATORES AMBIENTAIS E O PADRÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO NO TRECHO SUPERIOR DA BACIA DO RIO CORRENTE (GO)
Finisterra	Sociedade e Natureza

Fonte: A autora (2022)

O artigo 2 traz-se um estudo de caso comparando o escoamento simulado *versus* o observado no SWAT. O estudo contemplou a coleta, a organização e o tratamento dos dados das estações pluviométricas e fluviométricas durante o período de 1980 a 2020, perfazendo um período de quatro décadas. Esta série de dados foi dividida em partes, conforme os períodos de: processamento e simulação no modelo; dados do DEM, LULC, pedológicos,

hidrológicos e meteorológicos, a fim de comparar a influência dos eventos e investigar os impactos.

O SWAT favorece a análise dos aspectos dos gradientes de elevação e inclinação de uma bacia, com base nos fatores topográficos, em altos níveis de confiança. Os valores simulados de vazão e de produção de sedimentos no modelo, foram comparados com dados observados. O modelo foi calibrado e validado usando dados mensais de vazão para o posto fluviométrico de Alvorada do Norte, localizado dentro da área da bacia, no Estado de Goiás.

Discute-se ainda, o procedimento utilizado para a modelagem hidrológica, os *input's* da pesquisa e a avaliação da precisão do modelo. Desta forma, o modelo foi calibrado através do método de autocalibração SUFI-2 com o intuito de obter melhores ajustes para a modelagem. Os índices estatísticos (NSE e R^2) foram empregados para avaliar o desempenho do modelo na estimativa da vazão e da produção de sedimentos na bacia. Focou-se também nos períodos de simulação, nos critérios de avaliação do desempenho, nos métodos de análise e na correlação dos parâmetros utilizados. Com a aplicação do SWAT verificou-se, pelos índices encontrados, um modelo apto para simulações hidrossedimentológicas em uma bacia do Cerrado Brasileiro.

Desta forma, os dados dos componentes hidrológicos foram correlacionados com as mudanças de LULC na bacia, propiciando analisar os impactos decorrentes sob uma hidrologia que apresenta um relevo complexo em determinada parte da bacia, compreendendo características cársticas, de difícil recobrimento por métodos tradicionais. Fez-se ainda considerações sobre os procedimentos realizados, os problemas detectados e as soluções obtidas.

Já o artigo 3 discute as fases de aplicação do modelo, onde auxiliaram na detecção dos parâmetros mais influentes por período. Avaliou a usabilidade do SWAT na análise de geração de escoamento em uma bacia com ocorrência nas feições cársticas, pois o mesmo, desempenha um papel importante na retenção da umidade do solo, fornecendo evidências teóricas para uma restauração ecológica.

O SWAT apresentou uma análise de expansão de LULC, evidenciando que os impactos da preservação são menores do que das atividades de devastação. Contudo, a conservação do solo é relativamente alta na bacia. O armazenamento de carbono é obtido devolvendo-se as terras agrícolas às florestas/pasto, uma técnica de BPM bastante disseminada pela EMBRAPA, contribuindo-se para uma utilização sustentável.

4.2 IMPACTOS NA MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO SOB UMA HIDROLOGIA COM FEIÇÃO CÁRSTICA (NORDESTE GOIANO - BRASIL)

4.2.1 Apresentação

Este artigo compreende os resultados obtidos durante a pesquisa. Nele apresentou o artigo científico submetido à Revista Portuguesa de Geografia – Finisterra, onde foi apresentado os resultados da modelagem hidrológica obtida pelo modelo SWAT, os conhecimentos obtidos no entorno do objeto pré-determinado inicialmente no qual referenciou-se o padrão da geração de escoamento definida na porção alta da Bacia do Rio Corrente (ABRC), no Estado de Goiás, Brasil.

ARTIGO II



Finisterra, LVI(nnn), 2021, pp. x-x
ISSN: 0430-5027
doi: 10.18055/Finis19241
Artigo

IMPACTOS NA MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO SOB UMA HIDROLOGIA COM FEIÇÃO CÁRSTICA (NORDESTE GOIANO - BRASIL)

Ludmagna Pereira de Araújo
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Distrito Federal, Brasil
ludmagna@hotmail.com

Ruth Elias de Paula Laranja
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Distrito Federal, Brasil
laranja.ruth@unb.br

Venerando Eustáquio Amaro
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
venerando.amaro@gmail.com

Michael Vandesteen Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
michael.souto@geologia.ufrn.br

RESUMEN - El presente estudio evaluó la aplicabilidad del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para analizar el impacto de los cambios en el uso del suelo/cobertura del suelo (LULC) en la hidrología durante el período 1985 a 2019, en la parte alta del río Corrente (ABRC). Se cuantificó el patrón espacial de escurrimiento (SURq),

subsuperficial (GWq) y evapotranspiración (ET) en 35 (treinta y cinco) subcuencas y componentes hidrológicos correlacionados positivamente con gradientes topográficos en niveles de confianza altos. Se realizaron doce iteraciones, seis por cada periodo simulado, en calibración y validación con 100 simulaciones. Las distinciones geomorfológicas de infiltración rápida por fracturas de piedra caliza, combinadas con la distribución de áreas antrópicas bajo cubierta vegetal, tienen efectos notables en los gradientes de elevación y pendiente, p. en SURq: en tierras agrícolas y de pastoreo; en ET y en áreas urbanas y cuerpos de agua y, en GWq, en terrenos forestales. Los parámetros más influyentes por período simulado fueron: 1985 (ALPHA_BF, CN₂, GW_REVAP) y 2019 (ALPHA_BF, SOL_K, CN₂). El estudio concluyó que el volumen promedio de GWq simulado es mayor en el Área de Protección Ambiental (APA) de Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) y que el SURq es mayor en el Sudeste y menor en el Nordeste de la cuenca. Así, se puede afirmar que el enfoque propuesto es consistente con los efectos observados en la cuenca a partir de los resultados encontrados en la literatura internacional en diferentes regiones del mundo.

Palavras clave: *Análisis Estadístico; SWATUP; Modelado Hidrológico, Sedimento; Topografía.*

RESUMO - O presente estudo avaliou a aplicabilidade do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para analisar o impacto das mudanças de Uso da Terra/Cobertura do Solo (LULC) na hidrologia durante o período de 1985 e 2019, na porção alta da bacia do Rio Corrente (ABRC). O padrão espacial do escoamento superficial (SURq), de subsuperfície (GWq) e de evapotranspiração (ET) foram quantificados em 35 (trinta e cinco) subbacias e correlacionados positivamente os componentes hidrológicos com gradientes topográficos em altos níveis de confiança. Foram realizadas doze iterações, sendo seis por cada período simulado, na calibração e na validação com 100 simulações. As distinções geomorfológicas de infiltração rápida pelas fraturas das rochas calcárias, aliado a distribuição de áreas antrópicas sob a cobertura vegetal têm efeitos notáveis nos gradientes de elevação e inclinação e.g. no SURq: nas terras agrícolas e de pasto; na ET e em áreas urbanas e de corpos d'água e, no GWq, nas terras de florestas. Os parâmetros mais influentes por período simulado foram: 1985 (ALPHA_BF, CN₂, GW_REVAP) e 2019 (ALPHA_BF, SOL_K, CN₂). O estudo permitiu concluir que o volume do GWq médio simulado é maior na região da Área de Proteção Ambiental (APA) das Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) e, que o SURq é superior no Sudeste e menor no Nordeste da bacia. Assim, pode-se afirmar que a abordagem proposta é consistente com os efeitos observados na bacia a partir dos resultados encontrados na literatura internacional em diferentes regiões do mundo.

Palavras-chave: *Análise Estatística; SWATCUP; Modelagem Hidrológica, Sedimento; Topografia.*

ABSTRACT - The present study evaluated the applicability of the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) hydrological model to analyze the impact of Land Use/Land Cover Changes (LULC) on hydrology during the period 1985 to 2019, in the upper portion of the Rio Corrente (ABRC). The spatial pattern of runoff (SURq), subsurface (GWq) and evapotranspiration (ET) were quantified in 35 (thirty-five) subbasins and positively correlated hydrological components with topographic gradients at high confidence levels. Twelve iterations were performed, six for each simulated period, in calibration and validation with 100 simulations. The geomorphological distinctions of rapid infiltration by limestone fractures, combined with the distribution of anthropic areas under vegetation cover, have notable effects on elevation and slope gradients e.g. in SURq: in agricultural and pasture lands; in ET and in urban areas and water bodies and, in GWq, in forest lands. The most influential parameters per simulated period were: 1985 (ALPHA_BF, CN₂, GW_REVAP) and 2019 (ALPHA_BF, SOL_K, CN₂). The study concluded that the simulated average GWq volume is higher in the Environmental Protection Area (APA) of Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) and that the SURq is higher in the Southeast and lower in the Northeast of the basin. Thus, it can be stated that the proposed approach is consistent with the effects observed in the basin based on the results found in the international literature in different regions of the world.

Keywords: *Statistical Analysis; SWATUP; Hydrological Modeling, Sediment; Topography.*

RÉSUMÉ - La présente étude a évalué l'applicabilité du modèle hydrologique de l'outil d'évaluation des sols et de l'eau (SWAT) pour analyser l'impact des changements d'utilisation des terres/couverture des terres (LULC) sur l'hydrologie au cours de la période 1985 à 2019, dans la partie supérieure du Rio Corrente (ABRC). Le schéma spatial du ruissellement (SURq), du sous-sol (GWq) et de l'évapotranspiration (ET) a été quantifié dans 35 (trente-cinq) sous-bassins et des composantes hydrologiques positivement corrélées avec des gradients topographiques à des niveaux de confiance élevés. Douze itérations ont été effectuées, six pour chaque période simulée, en étalonnage et validation avec 100 simulations. Les distinctions géomorphologiques d'infiltration rapide par les fractures calcaires, combinées à la répartition des zones anthropiques sous couvert végétal, ont des effets notables sur les gradients d'élévation et de pente, par ex. en SURq : dans les terres agricoles et pastorales; en ET et en zones urbaines et plans d'eau et, en GWq, en terres forestières. Les paramètres les plus influents par période simulée étaient: 1985 (ALPHA_BF, CN₂, GW_REVAP) et 2019 (ALPHA_BF, SOL_K, CN₂). L'étude a conclu que le volume moyen simulé de GWq est plus élevé dans la zone de protection de l'environnement (APA) de Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) et que le SURq est plus élevé dans le sud-est et plus bas dans le nord-est du bassin. Ainsi, on peut affirmer que l'approche proposée est cohérente avec les effets observés dans le bassin sur la base des résultats trouvés dans la littérature internationale dans différentes régions du monde.

Mot clés: *Statistical Analysis; SWATCUP; Modélisation Hydrologique, Sédiment; Topographie.*

PONTOS DESTACADOS:

- Os efeitos dos gradientes de elevação e de inclinação têm efeitos notáveis no SURq;
- A correlação é útil para mapear o padrão espacial e tendência temporal na bacia;
- As abordagens de modelagens abrangem muitos dados ambientais e de monitoramento;
- O incremento da produção d'água pode promover melhoria na quantidade de erosão no solo;
- Distinguir o padrão espacial e os fatores de impacto que ocorrem no SURq da região.

4.2.2 Introdução

As rápidas transformações ocorridas no Uso da Terra/Cobertura do Solo, em inglês, *Land Use/Land Cover* (LULC) com a abertura da fronteira agrícola (MIRANDA, 2016) trouxe o desmatamento, alterando a interceptação, taxa de infiltração, estrutura do solo, condutividade hidráulica, rugosidade da superfície, reduzindo a evapotranspiração, aumentando a velocidade do fluxo superficial devido à falta de atrito desta cobertura vegetal, que comporta a densidade das raízes, índice foliar, compactação e profundidade do solo, destarte, sobre os recursos hídricos (RIGHETTO, 1998; SAMAL; GEDAM, 2021).

Devido às transformações antrópicas no Cerrado, muitos estudiosos recomendaram a utilização de um modelo capaz de auxiliar na análise desses impactos e a mitigação dos mesmos (CASTRO, 2013; SANTOS, 2016). Ao mapear e parametrizar a superfície da terra por meio de dados multitemporais, técnicas estatísticas aliados a modelos hidrológicos, pode-se realizar análises da dinâmica que às mudanças de LULC exercem sobre cada componente hidrológico na bacia (NEITSCH et al., 2011; TIAN et al., 2016). Detecta-se os impactos indesejados que acontecem no ecossistema na escala de bacia hidrográfica, fornecendo subsídios plausíveis para compreender melhor os fenômenos (SAMAL; GEDAM, 2022). De modo que, é crucial para o futuro do planejamento e/ou gestão dos recursos hídricos, melhorar a previsibilidade das consequências hidrológicas entorno das mudanças de LULC (NEITSCH et al., 2011; NIE et al., 2011).

Pondera-se a evolução com base na análise voltada para o planejamento em prol do desenvolvimento sustentável (SANTOS, 2016; NIE et al., 2011), visando prever os efeitos prováveis de futuras mudanças no LULC e, o que serão necessários para a melhoria hídrica, em quantidade e qualidade, a mitigação referente a perdas de sedimento, medidas de proteção às cavernas, entre outros (MALAGÒ et al, 2016; ARAÚJO; FIGUEIREDO; SOUTO, 2022).

Samal e Gedam (2022) corroboram que a variabilidade da resposta hidrológica chuva-vazão é gerida por três características físicas em relação ao transporte de sedimento nas bacias hidrográficas, tais como: solos, cobertura da terra e topografia estão intrínsecas, pois caso ocorra em pequena escala alguma alteração na cobertura e na topografia, a variação na resposta hidrológica na escala de bacia deve-se principalmente a mudanças no tipo de solo e assim, continuamente (RIGHETTO, 1998; NEITSCH et al., 2011).

Para Samal e Gedam (2021) o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) se destacou dos demais modelos hidrológicos, devido a notoriedade na aplicação em estudos hidrológicos. Neste caso, o SWAT tem base em Sistema de Informação Geográfica (SIG) possui uma interface de aplicação acoplada no ArcGIS Desktop, que permite a previsão do efeito das ações de mudanças de LULC sobre os recursos hídricos, devido à facilidade em obter parâmetros e variáveis (ARAÚJO; FIGUEIREDO, 2021).

Neste cenário, no Brasil existem muitas bacias hidrográficas que contém ambientes cársticos entre outras feições geomorfológicas, porém não é em todas que foram empregados o SWAT para realização de análises de forma eficaz, acessível e de baixo custo financeiro, portanto, a metodologia aqui utilizada é coeva, de várias fontes internacionais em destaque (MALAGÒ et al., 2016; ARAÚJO; FIGUEIREDO, 2021). Por este modelo, é possível realizar simulações do escoamento e recarga, assim como identificar perdas de solo pela erosão hídrica, por haver muitos fatores que exercem influência no ciclo hidrossedimentológico, possibilitando a partir dos resultados, efetuar a gestão de ma bacia hidrográfica (TIAN et al., 2016; HOU; GAO, 2019).

A busca pela representação mais precisa dos processos relativos ao modelo de fluxo é de grande interesse em estudos de conhecimento e simulação nas bacias hidrográficas. Neste ambiente empregam-se equações e algoritmos de quantificação, metrificação e espacialização dos níveis de degradação ambiental que assolam trechos de uma bacia. Diante deste contexto, a mensuração sistemática é uma

importante ferramenta de apoio à gestão desses valiosos recursos e dá suporte à tomada de decisão sobre mudanças LULC e sobre os componentes hidrológicos em uma determinada bacia hidrográfica (WANG; BRUBAKER, 2014; MALAGÔ et al., 2016; SANTOS, 2016).

Assim, é possível realizar uma análise dinâmica das características da variação espacial dos padrões de volumes do Escoamento Superficial (SURq), de Subsuperfície (GWq) e Evapotranspiração (ET), para simular a geração de escoamento e subsidiar apoio teórico para o desenvolvimento sustentável regional.

A conjunção de LULC com os fenômenos meteorológicos e hidrológicos determinam os efeitos do escoamento no carste (MALAGÔ et al., 2016), particularmente, nesta bacia hidrográfica, influencia a vazão de deflúvios que, por consequência, impactam as cavernas desta região, buscou-se assim, quantificar a contribuição das mudanças de LULC sobre os principais componentes hidrológicos voltados para a capacidade de geração do escoamento, investigar sua confiabilidade e aplicabilidade em uma área de escala regional.

Reconhece-se que as paisagens cársticas são altamente heterogêneas, difíceis de realizar análises sobre padrões espaciais do SURq e levam a notáveis diferenças espaciais na geração de escoamento (HOU; GAO, 2019). A bacia de estudo presenciou uma mudança expressiva no uso da terra nas últimas décadas, o que deve ter impactado a geração de escoamento da área, mesmo sob efeito de uma possível restauração ecológica.

As principais mudanças de LULC no período de 1985 e 2019 incluem no aumento de áreas de pastagens e declínio de terras de cultivo e floresta nativa. Um aumento no escoamento total, resposta mais rápida às inundações nas áreas de cavernas e diminuição da qualidade da água devido a carga de sedimento simulado na bacia, atributo das mudanças simultâneas de várias classes de LULC, conforme já citado.

Com base nessa premissa, observou-se neste estudo, que a mudança de LULC na hidrologia foi realizada a partir da classificação de imagens, com base em técnicas de geoprocessamento. Sendo assim, foi possível correlacionar a contribuição das mudanças nos LULC com as mudanças nos principais componentes hidrológicos responsáveis pela geração de escoamento. Seus impactos foram avaliados através de simulação utilizando o SWAT sob gradientes topográficos em escala de bacia hidrográfica.

4.2.3 Área de estudo

A porção alta da Bacia do Rio Corrente está contida no trecho superior da Unidade Hidrográfica da Bacia do Rio Corrente (**Figura 4.2**) localiza-se no Nordeste do Estado de Goiás, Cerrado Brasileiro. Abrange uma área de 3.932,9 km², possui uma extensão média do seu canal principal de 300 km, a altitude da nascente é de 867 m e a foz com cerca de 330 m (ALMEIDA et al., 2006). O clima é caracterizado como do tipo tropical, de acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger, Aw, de savanas tropicais, demarcados pela alternância entre duas estações bem distintas, a pluviosidade total de chuva anual varia entre 1.400 a 1.500mm. A elevação é de 474 a 1.029 m acima do nível do mar e a inclinação no território da bacia vai de 5,26 a 31,56°. A área exibe estruturas hidrogeológicas únicas, solos superficiais diversificados e descontínuos, processos hidrológicos rápidos, distribuições espaciais desiguais em recursos hídricos e terrestres, cujas unidades geológicas se restringem (**Figura 4.3**) a ambientes cársticos da área em questão do grupo Uruçuaia, grupo Areado e grupo Bambuí, sendo esta última, a unidade geológica mais antiga, do proterozóico, possuindo a maior área de concentração de cavernas da região, por onde passa o Rio Corrente e seus tributários; excetuando as coberturas recentes: detrito-lateríticas e depósitos colúvio-eluviais que bordeiam a bacia. Os cinco principais tipos de solos da bacia (**Figura 4.3; Tabela 4.1**) são: argilossolos, afloramentos rochosos, cambissolos, latossolos, neossolos e plintossolos (IBGE, 2022). Ultimamente, devido à interferência antrópica, os ambientes eco-geológicos frágeis de rochas calcárias, vem sendo impactadas, devido às mudanças de LULC, para áreas de pasto. Conforme o MapBiomas (2022) classifica o LULC da área em: terras agrícolas, pasto, floresta e área urbana, **Figura 4.4; Tabela 4.2**). Boa parte das florestas da bacia, estão contidas na Área de Proteção Ambiental (APA) das Nascentes do Rio Vermelho (ANRV) pertence ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), instituída diante do quadro de degradação ambiental, que afetam sobretudo, à oferta d'água para o abastecimento da população da região (BRASIL, 2007).

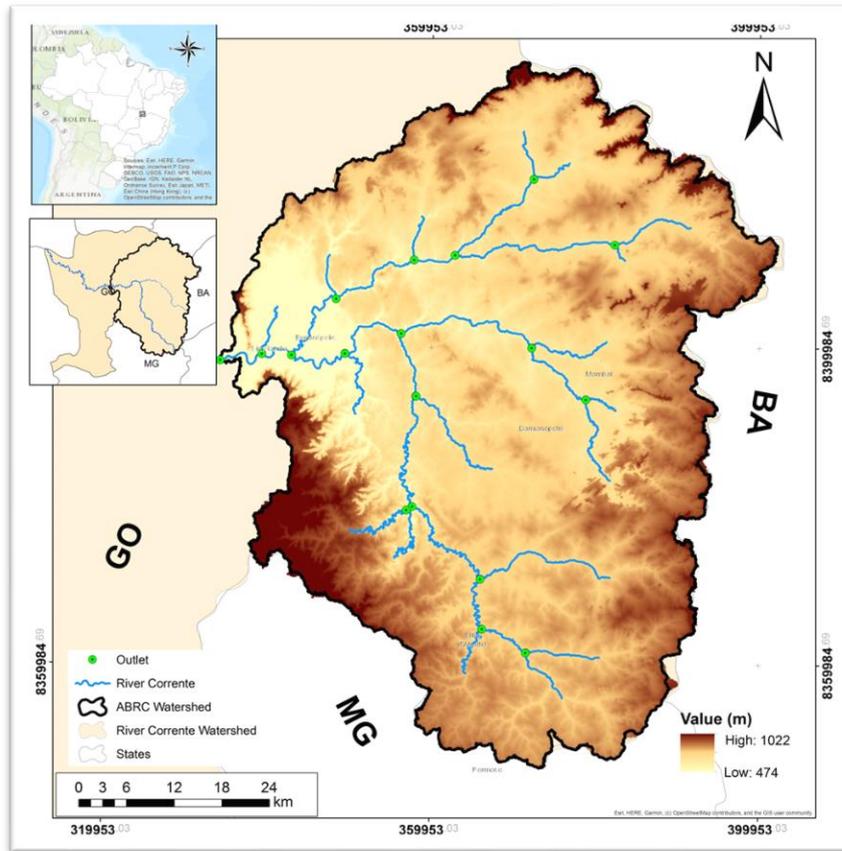


Figura 4.2 Localização do trecho superior da bacia do Rio Corrente, da área de estudo, com altimetria e exlúrtios
Figure 4.2 Location of the upper stretch of the Corrente River basin, of the study area, with altimetry and outlets
 Fonte: ALOS PALSAR Satellite Image (2022)

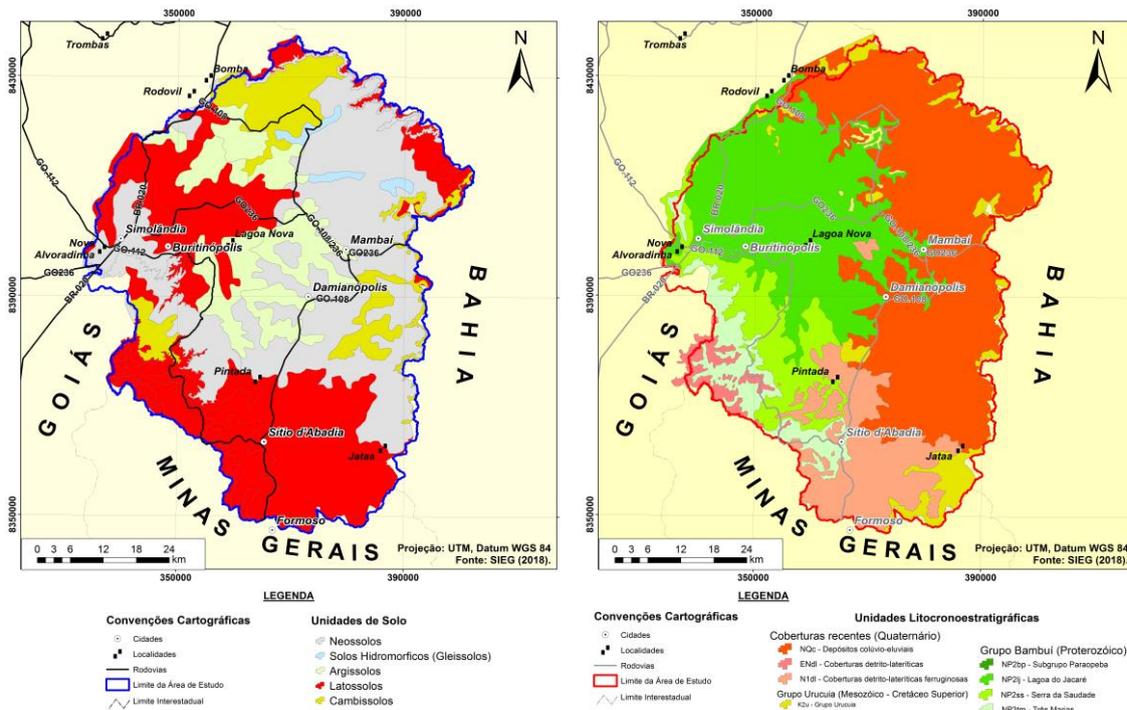


Figura 4.3 Classificação dos Solos e Unidades Geológicas na ABRC
Figure 4.3 Classification of Soils and Geological Units at ABRC
 Fonte: IBGE (2022); Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (2018)

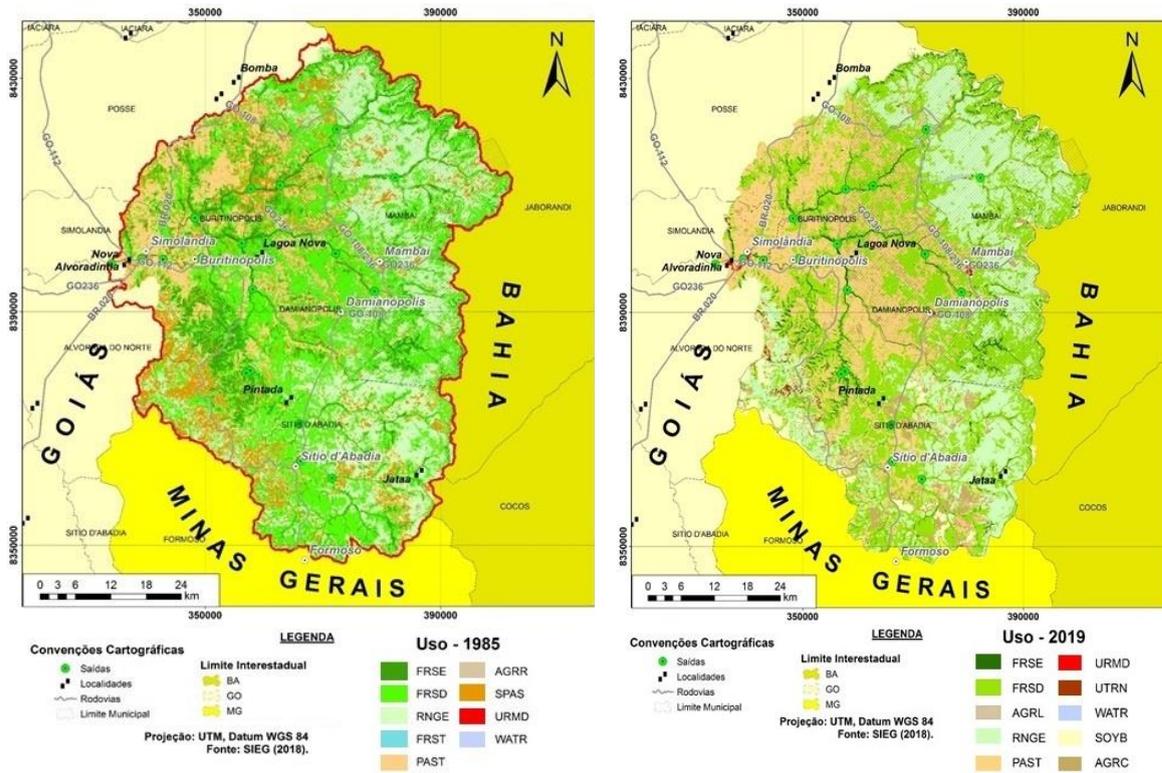


Figura 4.4 Classificação do LULC (1985) e LULC (2019)
Figure. 4.4 Classification of LULC (1985) and LULC (2019)
 Fonte: MapBiomass (2022)

Tabela 4.1 Dados das classes de solos para a inserção no modelo
Table 4.1 Soil class data for insertion in the model

CLASSE MAPA DE SOLO	SNAM SWAT	KM ²
Afloramentos rochosos	AFLR	13,18
Argissolos	ARG	738,94
Cambissolo	CX	248,01
Latossolos	LV	489,19
Neossolos	RQ	2.279,33
Plintossolo	FX	78,48
TOTAL		3.847,13

Fonte: Os autores (2022)

Tabela 4.2 Classes de LULC e respectivos percentuais utilizados para inserção no SWAT
Table 4.2 LULC classes and respective percentages used for inclusion in SWAT

SWAT Classes	Classes de LULC	Área Km ²	
		1985	2019
FRSE	Fm Florestal - Mata de Galeria	373,82	113,95
FRSD	Fm Savânica - Cerrado	1.432,51	1.464,45
AGRL	Floresta plantada	-	2,38
RNGE	Fm Campestre - Campo	1.009,71	1.044,57
FRST	Outra formação	21	-
PAST	Pecuária	451,67	899,44
SPAS	Mosaico de Agricultura	457,8	-
URMD	Infraestrutura Urbana	1,5	6,86
UTRN	Outra área não vegetada	-	14,37
WATR	Rio, Lago	1,43	10,86
AGRR	Cultura Anual e Perene - de fileiras	1,17	-

SWAT Classes		Classes de LULC	Área Km ²	
			1985	2019
SOYB	Soja	-	93,08	
AGRC	Outras lavouras temporárias	117,32	197,19	
		TOTAL	3.847,13	3.847,13

Fonte: Os autores (2022)

4.2.4 Modelagem hidrológica

O método utilizado foi dividido em duas partes: 1) modelagem hidrológica para simular os componentes hidrológicos para cada um dos mapas de LULC com escala temporal mensal de dois períodos (1985 e 2019); 2) Método de análise e correlação para determinar a contribuição das mudanças nas classes individuais de LULC na mudança individual dos componentes hidrológicos.

4.2.4.1 O SWAT

No modelo SWAT, uma bacia hidrográfica é dividida em várias subbacias, sendo estas, segmentadas em uma única unidade de LULC/solo/declividade com características únicas chamadas de Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). Cada HRU simula vários processos, entre eles, do ciclo hidrológico, rendimento de sedimentos e ciclo de nutrientes, que são agregados por subbacias (NEITSCH et al., 2011).

Os principais componentes hidrológicos da geração de escoamento estudados na bacia foram: SURq, GWq e ET. Para balizar a evapotranspiração no SWAT, foi escolhida a equação de Penman-Monteith. O modelo empírico da curva número (CN₂) tem base nos tipos de solos, classes de LULC, declividade e condições de manejo da terra (NEITSCH et al., 2011), que computa a permeabilidade do solo, de LULC e das condições antecedentes de umidade do solo com as quantidades de chuva mensais. A vazão de base (fluxo do GWq no canal) é calculada pela condutividade hidráulica do aquífero raso (subsuperficial), distância da subbacia ao canal principal e altura do lençol freático (NIE et al., 2011).

4.2.4.2 Dados de entrada no SWAT e avaliação da precisão

A inserção dos dados usados na configuração do modelo, sucedeu diretamente no ArcSWAT 2012.10_5.24 e no banco de dados no *default* do modelo, que incluem dados dos **parâmetros físicos**: mapas de LULC (escala de 1:100.000), dados de solos (escala 1:250.000), *Digital Elevation Model* (DEM) (com 12,5m de precisão). Desta forma, a escala de trabalho definida para bacia foi de 1:250.000. Mais a inserção dos dados hidrológicos da bacia e, das **variáveis climáticas**. No qual, os Mapas de LULC derivaram do mosaico do Bioma Cerrado, Coleção 3 e Coleção 5, com dados de sensoriamento remoto do LULC, sistema de projeção adotado foi UTM, Datum WGS84 zona 23 Sul, com resolução espacial de 30 m, utilizados para estudar a relação espacial e estatística entre uso da terra e variação da taxa de umidade na bacia.

A interseção vetorial das unidades de paisagem natural é feita pelo projeto MapBiomas, através de polígonos de intervenção antrópica. Simões (2019) alerta em sua pesquisa que é necessário também considerar que, a classe Pastagem foi superestimada, pois desconfia que na classificação do MapBiomas (2022) esta classe muitas vezes se mistura com agricultura e que, por isso, a classe de culturas anuais foi subestimada. Todavia, após o recorte do mosaico da área da bacia no ArcSWAT, foi feita a correspondência das classes no *default* do SWAT, com cerca de 13 (treze) classes predominantes.

Os dados multitemporais de LULC envolveu dois períodos (1985 e 2019). Um período (1985) refere-se ao resultado do desmatamento instaurado na década de 70 para expansão da agropecuária na região *versus* o outro período (2019) que reflete a aplicação de práticas conservacionistas a partir da virada do milênio aos dias atuais, tais como a criação da ANRV pelo ICMBio e parte da APA Simolândia pela Prefeitura Municipal de Simolândia, para preservação de espécies do Cerrado e contenção do quadro de desmatamento que vinha afligindo a área, acarretando em danos à oferta d'água para o abastecimento da população e às cavernas da região.

Em paralelo, é realizada a avaliação da precisão, de tal modo, a qualidade dos resultados de classificação do LULC foi avaliada por meio de um conjunto de dados secundários e apoiados em uma

visita de reconhecimento de campo, para avaliar o impacto da mudança de LULC na hidrologia. Deste modo, o MapBiomias (2022) disponibiliza todos os mapas anuais de cobertura e uso da terra produzidos a partir da classificação *pixel a pixel* a partir de imagens Landsat. Todo processo é feito através da plataforma *Google Earth Engine*, por extensos algoritmos, pelo qual oferece imensa capacidade de processamento na nuvem. Em seguida foi classificado o *raster* obtidos no formato matricial (*pixel* de 30x30m) do projeto MapBiomias (2022).

O diagrama da **Figura 4.5.a)** expõe uma visão geral das etapas metodológicas principais do processo de geração dos mapas anuais de cobertura e de uso da terra do MapBiomias, bem como os mapas de transição, com legendas, assim como a evolução ao longo das coleções. Para maiores detalhes sobre a metodologia utilizada pelo projeto MapBiomias para laboração dos produtos, o leitor pode consultar o sítio eletrônico da instituição. Em paralelo, na **Figura 4.5.b)**, esquematizou-se as etapas do processo compreendendo desde a aquisição do *raster* no MapBiomias, a organização, o recorte, o tratamento, os cálculos, a edição e a retificação para serem inseridas e extraídas do SWAT.



Figura 4.5 Roteiro metodológico da geração dos produtos a) MapBiomias; b) da ABRC até a saída no modelo
 Figure 4.5 Methodological guide for product generation a) MapBiomias; b) from ABRC to the output in the model.model
 Fonte: adaptado de MapBiomias (2022)

Após o *download* da imagem do bioma Cerrado, foi recortado uma poligonal para o tratamento de ruídos até a rasterização das imagens para cálculo *pixel a pixel* para serem devidamente inseridas no *input* do modelo e na tabulação dos dados no *default* do modelo. Após a finalização da modelagem, foi efetuada a extração do *raster* e a devida vetorização dos mapas conforme as demandas necessárias.

É confuso avaliar a precisão de mapas de LULC multitemporais sem a devida verificação do terreno para identificar as alterações que ocorrem na malha, não obstante, uma matriz de transferência conduziu o processo de precisão do mapa de LULC e descartar mudanças falsas por erros de classificação ou confusão espectral, refletindo na precisão geral de outros mapas (SAMAL; GEDAM, 2021).

Portanto, com um conjunto de dados secundários auxiliares, já validados do BRASIL (2015) foi gerada uma matriz de confusão e preparado o índice kapp para as imagens selecionadas. Como os mapas de LULC carregam informações históricas, vários conjuntos de dados secundários, foram validados a partir dos dados de referência do projeto TCCerrado (BRASIL, 2015) ano de 2013, utilizado como referência para validação. Na **Figura 4.6** é apresentado os procedimentos efetuados para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo pelos Autores, validação e a comparação com os produtos do MapBiomias (2022).

Durante a aquisição, o tratamento, a organização, o corte das imagens e o mapeamento dos dados de Uso e Cobertura da Terra dos Autores, foram utilizados os *softwares* ErMapper e ENVI, imagens orbitais do satélite Landsat para o ano de 2013, com resolução espacial de 30 metros, obtido no *site* eletrônico da USGS, onde as mesmas já se encontravam tratadas, o que exigiu poucas correções. Assim, por meio de algoritmos, permitiu-se a execução de múltiplas tarefas necessárias para obtenção de resultados que favoreçam a tomada de decisão.

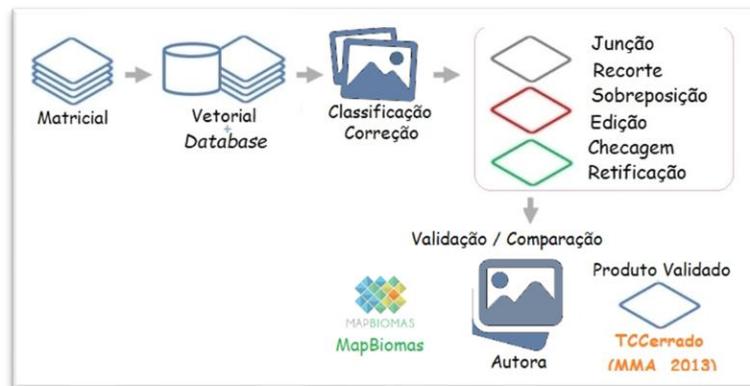


Figura 4.6 Diagrama da preparação e manuseio das imagens no modelo e da ABRC
 Figure 4.6 Diagram of the preparation and handling of images in the model and ABRC
 Fonte: adaptado de MapBiomias (2022)

Fez-se os devidos tratamentos, a clipagem, a escolha das bandas para realce das classes supervisionadas (ROI's) no ENVI, com reclassificação manual até sua transformação em polígonos. De posse destes produtos, com os dados tabulares e os gráficos em mãos, buscou-se conhecer os produtos do MapBiomias (2022).

Para a aquisição dos produtos do MapBiomias, realizou-se o cadastro no próprio *site*, do *GoogleEarth Engine Code*, para *download*, objetivando realizar uma comparação com os produtos dos Autores e contatou-se uma semelhança nos resultados. Depois da avaliação da consistência dos dados, optou-se em utilizar na pesquisa os produtos prontos, validados e certificados do MapBiomias para a bacia, para atender o objeto desta pesquisa. Como se trata de ciência, é importante apreciar os experimentos e registrar a evolução da metodologia e do pensamento para futuros procedimentos.

Na discussão deste estudo foram apresentados e analisados os cruzamentos, os gráficos elaborados e a realização da análise multitemporal dos eventos. Com isso, houve uma nova condução no rumo da pesquisa, a partir da qual foi possível tratar com certa qualidade e velocidade, a série histórica para ser inserida no SWAT. Esta etapa foi fracionada: 1) na coleta de imagens; 2) no tratamento, na catalogação e na organização por classes/ano; 3) na seleção e clipagem do mapa de uso da terra com definição das classes; 4) na reclassificação dos produtos do MapBiomias para entrada na SWAT; 5) na obtenção dos *outputs* do modelo simulado; 6) nos cálculos das classes para geração de gráficos estatísticos e; 7) na análise dos resultados (Figura 4.5.b).

Verificou-se que os produtos do MapBiomias (2022) utilizam as mesmas bases metodológicas para classificação das feições e a mesma escala de trabalho e período da pesquisa, para confecção do mapa de uso e cobertura da terra feita pelos Autores. A comparação se deu a partir de amostras do produto validado TCCerrado (2013) (BRASIL, 2015) na escala 1:250.000 para gerar o coeficiente kappa, que considera todos os elementos da matriz de erros ao invés de apenas aqueles que se situam na diagonal principal da mesma, ou seja, estima a soma da coluna e das linhas marginais. A avaliação de precisão do mapa de LULC de 2013, foi produzido a partir dos dados da imagem LANDSAT, ressentiram tanto matriz de confusão quanto às estatísticas do kappa. Em termos de precisão do mapa de LULC de 2013 do MapBiomias o coeficiente kappa é de 87%. A precisão dos produtos de todas as classes de LULC têm cerca de 85% de precisão. Pode-se levantar uma questão óbvia, de como seria a mesma precisão para todas as imagens passadas.

Nota-se que a concordância geral dos mapas que tem base nas imagens do satélite LANDSAT, pode ser considerada entre substancial a quase perfeita. Avaliando cada uma das três classificações, percebe-se que a concordância é alta quando os avaliadores atribuem o mapeamento do produto validado TCCerrado do BRASIL (2015), com o do MapBiomias (2022, no ano de 2013). No entanto, ao atribuir ao mapeamento dos Autores (ano de 2013), o conceito foi intermediário, pois a concordância já não é tão perfeita.

Quanto ao de solo, foi utilizado o mapa base do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), na escala 1:250.000, dos “tipos de solos do Brasil”, para a classificação hidrológica dos solos do *United States Department of Agriculture* (USDA), por grupos hidrológicos de A e D, contendo dados da profundidade física (percentual de volume de cascalho, areia/silte/argila, umidade efetiva) e propriedades químicas (carbono orgânico e cátion, capacidade de intercâmbio) coletadas de publicações relevantes e pesquisas realizadas para o mesmo local de estudo. Referente ao DEM, se deu a partir do

Alaska Satellite Facility (ASF), United States Geological Survey (USGS) e EarthData (NASA) com resolução de 12,5 m. Todavia, o mosaico da imagem ALOS PALSAR (2022), de 2011, consistiu de duas quadrículas, ALPSRP267816890 e ALPSRP267816880.

Referente às informações hidrológicas contou dados de vazão mensais medidos da estação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2022) de 1980 a 2020. As reanálises ponderaram de 03 (três) estações hidrológicas a partir do sistema HIDROWEB (ANA, 2022): A estação hidrológica Alvorada do Norte, código 21300000, foi a única estação, contida dentro da área da bacia, com predomínio de neossolos e latossolos na confluência da subbacia 17 (dezessete); A estação fluviométrica Flores de Goiás (Código ANA 21220000) está situada à Oeste e a estação Piratinga (Código 43360000), a Sul da ABRC, ambas situam fora da área limítrofe da bacia estudada. Para consistência dos dados, foi utilizado o manual da ANA (2012). Outros dados vetoriais inseridos no *input* do modelo foram de bacias hidrográficas Otocodificada do Brasil (*polygon*), rios (*line*) para distribuição do caminho do fluxo (ANA, 2022).

Agora, referente às variáveis climáticas abrangeu dados do sistema HIDROWEB (ANA, 2022); BDMEP (INMET, 2022); Rede de estações do AGRITEMPO (2022) e no *GlobalWeatherData* (SWAT, 2022). Reanálise dos dados de 17 estações (precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) ocorreram dos períodos de 1980 a 2020. Os dados das estações climatológicas utilizados na configuração do modelo e respectivos códigos das estações, foram: -Agritempo: Alvorada do Norte 3420 e 3421, Posse 3164, 3506 e 3507; Sítio D'Abadia 3337; -INMET: Formoso 83379 e Posse 83332; -*Global Weather Data*: 459 Global-142, 145 e 148; 463 Global-142, 145 e 148 e 466 Global-142, 145 e 148.

4.2.4.3 Calibração e validação do modelo

Após a conversão e uniformização da base climatológica de entrada de dados diários para mensal de precipitação, temperatura, umidade, radiação solar e vento, é realizada as configurações e a simulação inicial que foi armazenada na pasta *TxtInOut* que é importada no *SWAT-Calibration and Uncertainty Program* (SWATCUP) versão 5.1.6.2 e o algoritmo de otimização *Sequential Uncertainty Fitting 2* (SUFI-2) para comparação por testes estatísticos no modelo e prognosticar a bacia. O fluxo dos dados medidos das estações hidrológicas foi usado para calibrar e validar a vazão no modelo. O inter-relacionamento das informações (*layers*) permitiu integrar informações espaciais multitemporais.

A calibração no SWAT foi aplicada conforme **Tabela 4.5** cujo parâmetros mais sensíveis para o estudo foi ajustado para o bioma Cerrado, conforme indicado na literatura e listado na **Tabela 4.6**, resultando em 17 (dezessete) parâmetros escolhidos para simulação da vazão e carga sedimentar.

Para simular o *GWq* foram adaptados os parâmetros para o bioma Cerrado: ALPHA_BF, GW_REVAP, GW_DELAY GWQMN; REVAPMN, RCHRG_DP e SHALLST; SURq: CH_N₂, CN₂ e SURLAG; ET: ESCO e os parâmetros de Água no solo, tais como: SOL_AWC, EPCO e SOL_K; Perda de água por transmissão: CH_K₂; Produção de Sedimentos: ADJ_PKR, CH_COV₁, CH_COV₂, LAT_SED, PRF, SLSUBBSN, SPCON, SPEXP, USLE_C, USLE_K e USLE_P (Castro, 2013; Simões, 2019). Já os valores obtidos na calibração da vazão de base (*GWq*) foi ALPHA_BF para os fluxos inferior e superior, GW_REVAP e GW_DELAY prevaleceram no *ranking* dos cinco parâmetros mais sensíveis para a bacia; já a ET, o parâmetro mais próximo foi o EPCO, para controlar a tomada de água no perfil do solo pela quantidade demandada pelas plantas, o ESCO e SOL_AWC não atingiu o *ranking* cinco de sensibilidade; Em seguida, prevaleceu no SURq o parâmetro CN₂ na condição de umidade II. Pela análise da **Tabela 4.7**, percebe-se que os parâmetros ALPHA_BF e CN₂ tiveram comportamento dominante.

Tabela 4.3 Períodos utilizados e função detalhada da modelagem

Table 4.3 Periods used and detailed modeling function

PERÍODO	1985	2019	Anos
Aquecimento	01/01/1980 a 31/12/1983	01/01/1997 a 31/12/2000	4
Calibração	01/01/1984 a 31/12/1997	01/01/2001 a 31/12/2014	14
Validação	01/01/1998 a 31/12/2003	01/01/2015 a 31/12/2020	6
Total de anos simulado	23 anos	23 anos	40

Fonte: Os autores (2022)

Tabela 4.4 Lista dos parâmetros mais sensíveis identificados em alguns estudos de vazão

Table 5.2. List of the most sensitive parameters identified in some studies of the flow

N°	AUTOR	BACIA	RANKING DO PARÂMETRO				
			1	2	3	4	5
1	Castro (2013)	Jardim	SURLAG	ALPHA_BF	CN ₂	GWQMN	SOL_K
2	Ferrigo (2014)	Descoberto	SOL_K	CN ₂	SOL_AWC	SHALLST	ANION EXCL
3	Dantas (2016)	Taperoá	CN ₂	GW_REVAP	ALPHA_BF	SOL_AWC	GWQMN
4	Santos (2016)	Gama	ESCO	GW_DELAY	SOL_AWC	CN ₂	SHALLST
5	Simões (2019)	Indaiá	CN ₂	GW_REVAP	SOL_K	ALPHA_BF	ESCO
6	Hou e Gao (2019)	Sancha	CN ₂	SOL_AWC	ALPHA_BF	GWQMN	CH_K ₂

Fonte: Os autores (2022)

Tabela 4.5 Valores T-Stat e P-Value na calibração e classificação da sensibilidade
Table 4.5 T-Stat and P-Value values in the calibration and classification of sensitivity

Ranking	Método	Parâmetro	Extensão	T-Stat	P-Value
1985					
1	V	ALPHA_BF	gw	-23.07	0.00
2	R	CN ₂	mgt	-6.45	0.00
3	R	GW_REVAP	gw	2.53	0.01
4	V	GW_DELAY	gw	1.88	0.06
5	R	EPCO	bsn	-1.24	0.22
2019					
1	V	ALPHA_BF	gw	-37.78	0.00
2	R	SOL_K	sol	-2.01	0.05
3	R	CN ₂	mgt	-1.72	0.09
4	V	GW_DELAY	gw	1.57	0.12
5	R	EPCO	bsn	-1.31	0.19

Fonte: Os autores (2022)

4.2.4.4 Critérios de avaliação do desempenho

Pautou-se na avaliação do desempenho do modelo: 1) Coeficiente de eficiência NSE (Nash; Sutcliffe, 1970) e no coeficiente de determinação R²; 2) Inspeção visual por hidrogramas; e, 3) União dos fatores P e R para mostrar o peso da calibração e validação, bem como das incertezas previstos pelo modelo (SAMAL; GEDAM, 2021). As estatísticas do 95 Percent Prediction Uncertainty (U95PPU), faixa de incerteza de predição de 95% dos valores do simulado e o arquivo Summary_stat (Abbaspour, 2015) refletem os resultados.

O desempenho de calibração/validação do modelo SWAT é considerado aceitável quando o R² e NSE são maiores que 0,5 (NIE et al., 2011; SANTOS, 2016).

4.2.5 Análises e correlações

Antes das análises múltiplas, as correlações entre as variáveis foram computadas para avaliar a relação entre as variáveis. Mudanças nos comportamentos hidrológicos entre duas simulações usando mapas de LULC em cada período, 1985 e 2019, respectivamente, foram relacionadas à mudanças de LULC para quantificar o efeito de mudanças de LULC para os componentes hidrológicos (Nie et al., 2011). As variáveis com diferentes funções dependentes são as mudanças para as cinco classes de LULC (ou seja, Terras Agrícolas_SPAS, Fm Campestre - Campo_RNGE, Pasto_PAST, Fm Florestal - Mata de Galeria_FRSE e Fm Savânica - Cerrado_FRSD) em contraste as médias obtidas das variáveis dependentes (respostas) dos três componentes hidrológicos dos dois períodos, para simular a geração de escoamento (ET, GWq e SURq).

Posteriormente, no *software* JAMOVI (THE JAMOVI, 2022), as informações dos mapas de LULC foram correlacionadas com o comportamento da hidrologia segundo a dimensão espacial e aplicou-se o R

do Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP) (SAMAL; GEDAM, 2021). A escolha dos representantes dos fatores ambientais (FRSE e FRSD) e fatores antrópicos (PAST, RNGE e SPAS) nessas classes procede das consequências de muitas classes de LULC combinadas com os componentes hidrológicos.

4.2.5.1 Avaliação do desempenho do SWAT

A estimativa da performance do modelo se deu a partir da geração do ciclo hidrológico no SWAT, os resultados a partir do volume total da precipitação pluviométrica, com estimativas médias dos parâmetros do período simulado, o leitor pode consultar Alves, Martins & Ferreira (2022) para comparação do balanço hídrico no Cerrado. Ao conferir os resultados para o SURq e ET com os valores obtidos em estudos realizados na região Centro-Oeste do Brasil, observa-se que o modelo em 2019, subestimou cerca de vinte vezes o fluxo lateral, superestimou o dobro a ET, o SURq e, por conseguinte, o escoamento total.

Período de 1985. A ET compõe cerca de 360mm (19,54%) do volume precipitado (1.854,5mm), o SURq com 132mm (7,16%), fluxo lateral (24,53%) com 454mm, percolação (54,25%) com 1.006mm, 49,79% o fluxo de base (923mm), recarga para o aquífero profundo (2,71%) com 50mm e ascensão capilar do aquífero raso (1,85%) em 34mm. O balanço hídrico para o período de 2019 apresentou os seguintes resultados: 1.954,5mm do total da chuva foi convertido em ET (37,44%) com 73,81mm, SURq (6,59%) com 128,84mm, em fluxo lateral (1,62%) com 31,67mm em água disponível para percolação (54,64%) em 1.067,85mm, em fluxo de base (51,1%) com 998mm, ascensão capilar do aquífero raso (1,92%) ficou em 37,43mm e 69,3mm é a recarga do aquífero profundo (3,55%).

Ao observar os valores apresentados na literatura, observa-se que o modelo subestimou a ET, um elevado valor de SURq e de escoamento total em que esse valor, não deveria ultrapassar 3% do total precipitado. Entretanto, o valor de CN₂ gerado pelo modelo se mostrou baixo para a área de estudo, visto que a bacia ainda não apresenta alto grau de urbanização.

O valor do fluxo do aquífero profundo encontrado em 2019 foi de 69,3mm; contudo para ano 1985 ficou muito abaixo do esperado (50,30mm), 3,55 e 2,71% respectivamente, pois, de acordo com trabalhos feitos por Lima et al. (2013) e Santos (2016), este valor no Cerrado é de 25% do precipitado.

A diferença observada nos períodos estudados em relação aos dados observados, foi comparada no desempenho geral do modelo. A partir da análise dos resultados representativos da vazão simulada e observada, é possível afirmar que o SWAT não simulou de forma satisfatória a vazão na bacia (NIE et al, 2011; ALVES; MARTINS; FERREIRA, 2022) corrobora que, os valores de NSE < 0 são considerados como níveis não aceitáveis de desempenho, pois o valor médio das séries temporais observadas é um melhor preditor do que o modelo (sem calibração).

Deste modo, na primeira rodada da calibração foram realizadas 10 simulações em média e mais cinco iterações, a partir dos dados de vazão observados na bacia, conforme **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 Critérios para examinar a precisão da calibração e validação do modelo.
Table 4.6 Criteria for examining model calibration and validation accuracy.

Índice Período	Calibração		Validação	
	1985	2019	1985	2019
Simulações	100	100	100	100
fator p	0.82	0.90	0.93	0.49
fator r	5.67	6.95	6.30	1.87
R ²	0.25	0.23	0.27	0.27
NSE	-0.50	-0.66	-0.31	0.01

Fonte: Os autores (2022)

Outras possíveis razões devem-se à limitação do método CN₂, pois o método, conforme Nie et al. (2011), não considera a duração e intensidade da precipitação mensal, entre outras incertezas na simulação da vazão são investigadas. O escoamento pequeno é subestimado pelo método CN₂, sendo que se superestima grandes eventos (NIE et al., 2011).

Observou-se que o modelo superestimou a precipitação cerca de 280mm a mais por período, oscilando de 304,50 a 684,50mm, idêntico a informação na literatura e de excessos de água fornecida no SWATCheck.

Todavia, o comportamento dos dados médios mensais entre o período 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2020 resultante dos períodos simulados, obtidos das estações meteorológicas e

hidrológicas são apresentados **Figura 4.7**, dos dados de série multitemporal (1985 e 2019) condizentes com os respectivos períodos de calibração e verificação do modelo.

Observa-se, além da discrepância, maior variabilidade dos valores simulados em relação aos observados, em comparação às vazões mensais na qual pode-se observar a tendência do modelo superestimar as vazões nas estações chuvosas e subestimar nas estações secas. O Best_Sim diz respeito a melhor simulação no modelo obtido pelo SWATCUP, assim como as estatísticas do U95PPU próximos ao observado (ABBASPOUR, 2015).

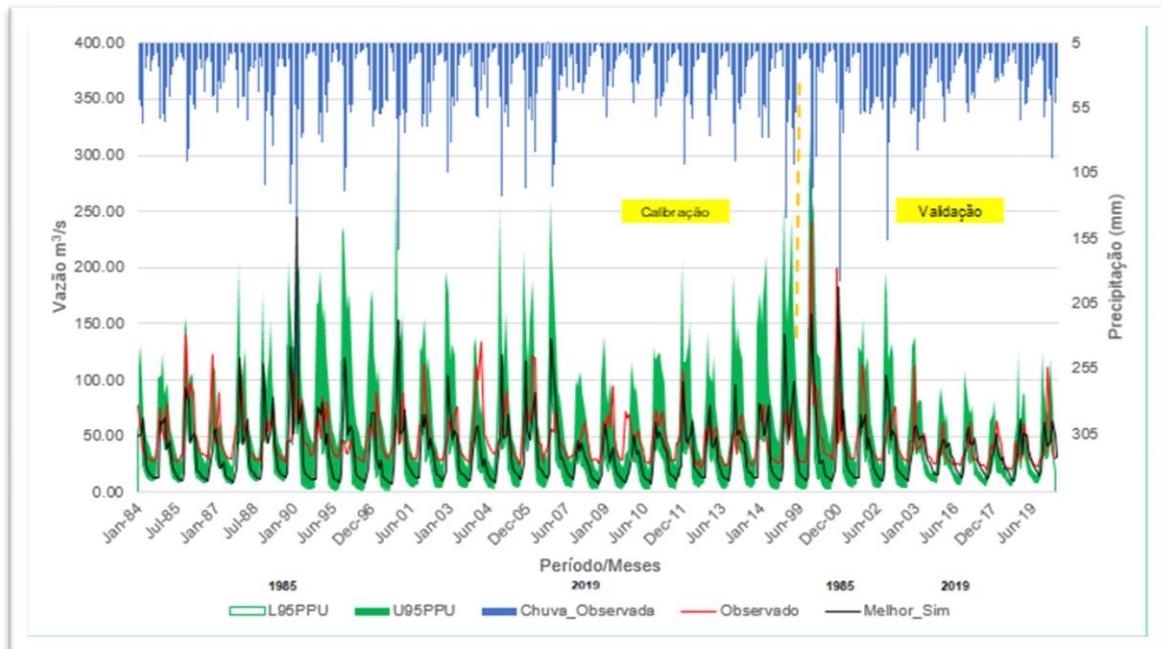


Figura 4.7 Comparação do fluxo mensal durante o período de calibração e verificação do modelo

Figure 4.7 Monthly flow comparison during the model calibration and verification period

Fonte: Os autores (2022)

Em comparação com o período simulado de 1985, os picos de vazão médios mensais foram superestimados pelo modelo em quase duas vezes, apresentando valores máximos de até $470 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, onde os picos máximos observados não ultrapassam $237 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Já o escoamento de base apresenta em seu menor valor $0,38 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto a vazão mínima observada no mesmo período apresenta um valor de $26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou seja, em ambas as simulações por período, são quase 20 (vinte) vezes maiores.

Referente ao período simulado de 2019, os picos de vazão médios mensais foram superestimados pelo modelo quase duas vezes, apresentando valores máximos de até $366 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, onde os picos máximos observados não ultrapassam $133 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Já o escoamento de base apresenta em seu menor valor $0,94 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto a vazão mínima observada no mesmo período apresenta um valor de $19,36 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nota-se, assim, um erro mais expressivo nas vazões mais baixas (nos períodos de estiagem), o que evidencia a dificuldade do modelo de simular o movimento da água subterrânea.

O projeto inicial foi reajustado, abreviando-se dados importantes de campo, de alimentação contínua, de dados detalhados de monitoramento relacionados ao cenário específico do projeto de gestão agroecológica e hídrica da bacia, dos reservatórios em operação, de variáveis físico-químicas e microbiológicas, de irrigação, de geração de energia, de abastecimento, de qualidade da água, dados sobre padrão de cultivo, colheita, pesticidas, fertilizantes etc., dados de campo, tais como: de cavernas, fratura/fissuras, sumidouros e dolinas. Com estes dados específicos, os resultados do modelo tendem a ser melhorados, pois, durante o período pandêmico do coronavírus (COVID-19), esta atividade de campo não pode acontecer, favorecendo nos fracos índices estatísticos para o relevo cárstico e desempenho do modelo, todavia indicou-se os parâmetros e variáveis dos *input's* pré-existentes, como uma contribuição.

De qualquer forma, na literatura há esclarecimentos maiores sobre estes índices estatísticos, no relevo cárstico, tal qual Wang e Brubaker (2014) alertam que o GWq é calculado usando um modelo de reservatório linear, com vazão proporcional ao do armazenamento, podendo resultar em um NSE baixíssimo devido às características genéticas deste tipo de formação geomorfológica com rocha calcária.

Sendo assim, um NSE negativo pode não significar necessariamente como um modelo ruim e por isso não foi usado como um índice único para avaliação do modelo.

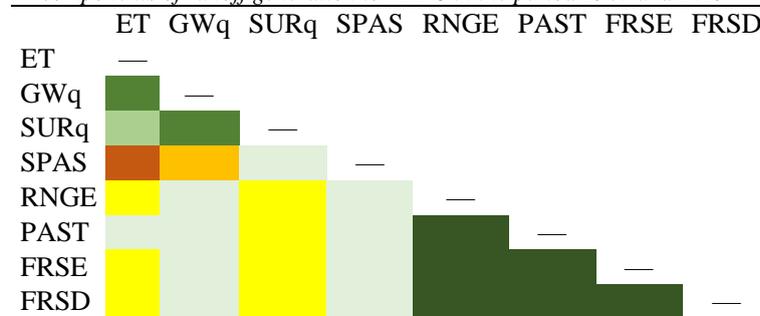
4.2.5.2 Impactos das mudanças de LULC nos componentes hidrológicos da bacia

Uma comparação dos mapas de LULC para os anos de 1985 e 2019 indicam que as mudanças mais significativas ocorreram em cinco classes de LULC, os quais foram: (Terras Agrícolas_SPAS, Fm Campestre - Campo_RNGE, Pasto_PAST, Fm Florestal - Mata de Galeria_FRSE e Fm Savânica - Cerrado_FRSD) em contraste as médias obtidas das variáveis dependentes dos três componentes hidrológicos, para simular o padrão da geração de escoamento (ET, GWq e SURq) estudados.

Decerto quando avaliada a correlação da geração de escoamento com os fatores antrópicos, um coeficiente de correlação (R) é apontado na matriz de correlação da **Tabela 4.7**, variáveis com diferentes funções dependentes, obtidas de cada uma das 35 subbacias.

Tabela 4.7 Extensão proporcional de mudanças de LULC, valores médios anuais da bacia de mudança dos componentes hidrológicos de geração de escoamento para a ABRC no período de 1985 e 2019

Table 4.7 Proportional extent of LULC changes, annual average values of the basin of change of hydrological components of runoff generation to ABRC in the period 1985 and 2019



Intensidade da correlação		Valor	
		Positiva	Negativa
Perfeita	0,9-1,00		
Forte	0,7-0,9		
Moderada	0,5-0,7		
Fraca	0,3-0,5		
Ínfima	0,1-0,3		
Nula	0		

Fonte: Os autores (2022)

As descrições a seguir, discorrem à nível de bacia.

O impacto global da mudança do LULC da geração de escoamento na bacia é realizado em comparação com o período de simulação (1980 - 2020). O SURq médio anual sobre a bacia é de 35,87mm, menor que o mapa de LULC de 1985, de 35,96mm e este, menor que o mapa de LULC de 2019, de 56,79mm.

As mudanças relativas no SURq a partir dos mapas de LULC de 1985 e 2019 variaram de 28,31mm na classe de floresta campestre a -121,67mm em terras de pasto. De acordo com o mapa LULC de 1985, a correlação entre terras agrícolas e SURq possui um coeficiente de correlação muito fraco ($R = 0,10$, $p = 0,8707$), porém nota-se um aumento no SURq em subbacias que tiveram um aumento em terras agrícolas em vez de erro de simulação do modelo (SAMAL; GEDAM, 2021).

As mudanças no LULC que mostraram correlação positiva expressivamente muito forte ($R = 1,00$ e P value de 0,0001 e 0,0004 respectivamente) foram os grupos de florestas (Cerrado e Mata de Galeria). Com alto nível de significância, grupo de florestas (Cerrado, Mata de Galeria e Campestre) com pasto ($R > 0,9$ e o valor P entre 0,0007 a 0,0116).

Os componentes hidrológicos da geração de escoamento: GWq, ET e SURq têm correlação positiva significativamente forte ($R = 0,75$ a 0,86 concomitantemente um P no valor de 0,0603 e 0,1466).

Terras agrícolas e os componentes hidrológicos ET e GWq tiveram correlação negativa muito forte ($R = -0,85$) e fraca ($R = -0,29$). Já os componentes hidrológicos estudados tiveram os índices de correlação muito fraco entre os LULC os grupos de floresta, área de pasto e cultivo (R entre -0,07 a -0,12

respectivamente e P value entre 0,8396 a 0,9065). Todos os eventos passaram no teste de 0,01 de nível significativo.

Áreas com mais de 80mm de escoamento estão espalhadas pelo Sudoeste da bacia, no período simulado de 2019 e, no Norte (1985). Isso ocorre porque a bacia está situada em uma área com feições cársticas e os padrões de *runoff* da superfície são altamente heterogêneos (HOU; GAO, 2019).

O SURq total é relativamente baixo na ABRC, porém, constatou-se que o período de 1985 foi maior que 2019. Teve um valor médio de 168mm de 1985 e 117mm no período de 2019, refletindo uma notável heterogeneidade espacial. As quantidades reais de ET permanecem em certas partes das regiões Sudeste (1985) e Centro-Sul, em 2019. Referente a **Figura 4.8** e **Figura 4.9** mostram que não há diferenças marcantes nos atributos climáticos, principalmente na precipitação.

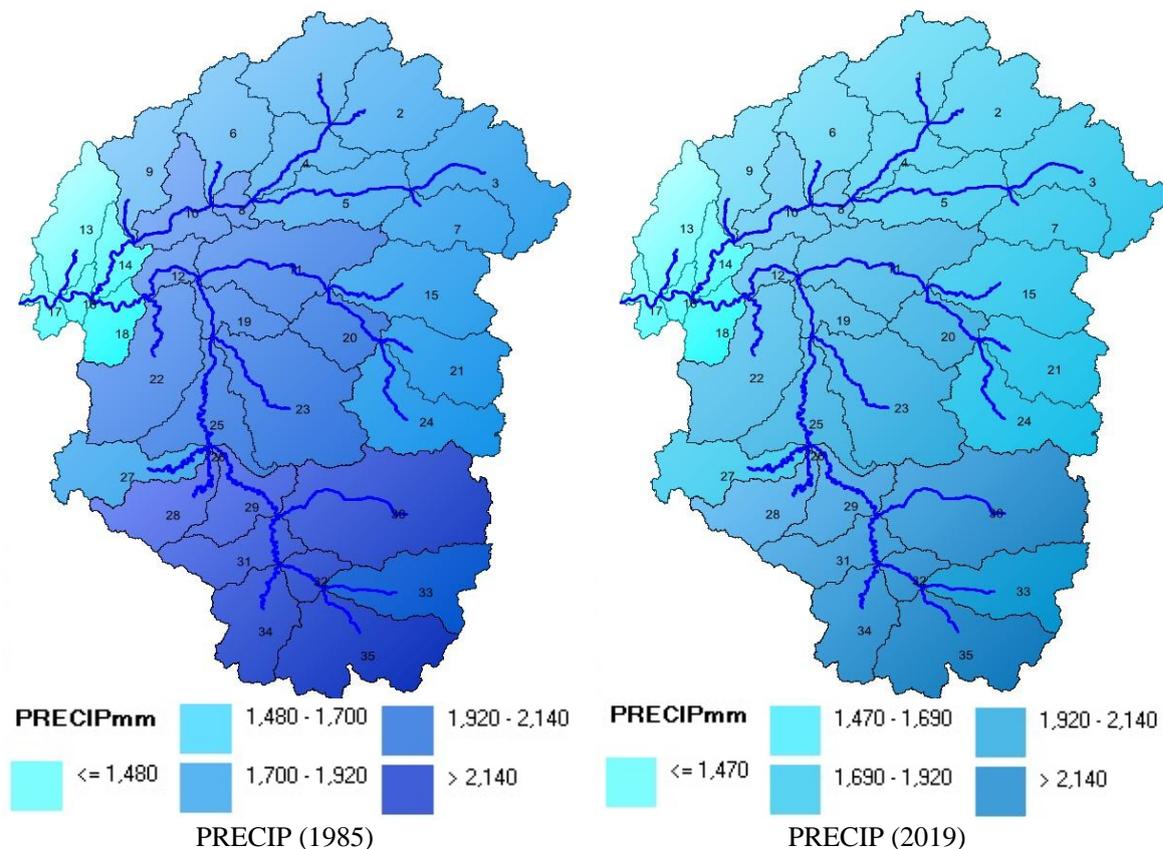


Figura 4.8 Mudança sensata da precipitação simulado por sub-bacia

Figure 4.8 Sensible change in precipitation simulated by sub-basin

Fonte: Os autores (2022)

A cobertura vegetal influencia o escoamento reduzindo a energia cinética das gotas de chuva, interceptando a precipitação, modificando as crostas do solo, alterando a capacidade de infiltração do solo (NEITSCH et al, 2011). Existem diferenças relativamente significativas no SURq e GWq entre os diferentes tipos de LULC.

Referente ao período simulado de 2019, a área de pasto apresenta o maior SURq entorno de 204mm, seguido por terras agrícolas (SPAS). A percolação GWq é responsável por cerca de 20% do GWq em Florestas (FRSE) é o mais alto seguido por classes de florestas com baixo grau de antropização (FRSD). Conforme *SWATCheck*, nas classes de uso: FRSD, FRSE, RNGE, PAST e SPAS, mais de 69% da produção de água é fluxo de base. Nas classes Fm campestre (RNGE) e terras agrícolas (SPAS), apresentam um SURq muito baixo e na classe terras de pasto a água disponível podem ser muito baixa.

Antes, o estudo enfrentou uma série de limitações relativos à suposição do modelo, qualidade e disponibilidade de dados que devem ser considerados na hora da execução do modelo e na interpretação do que foi produzido e, foi verificada semelhança com outras respostas no modelo.

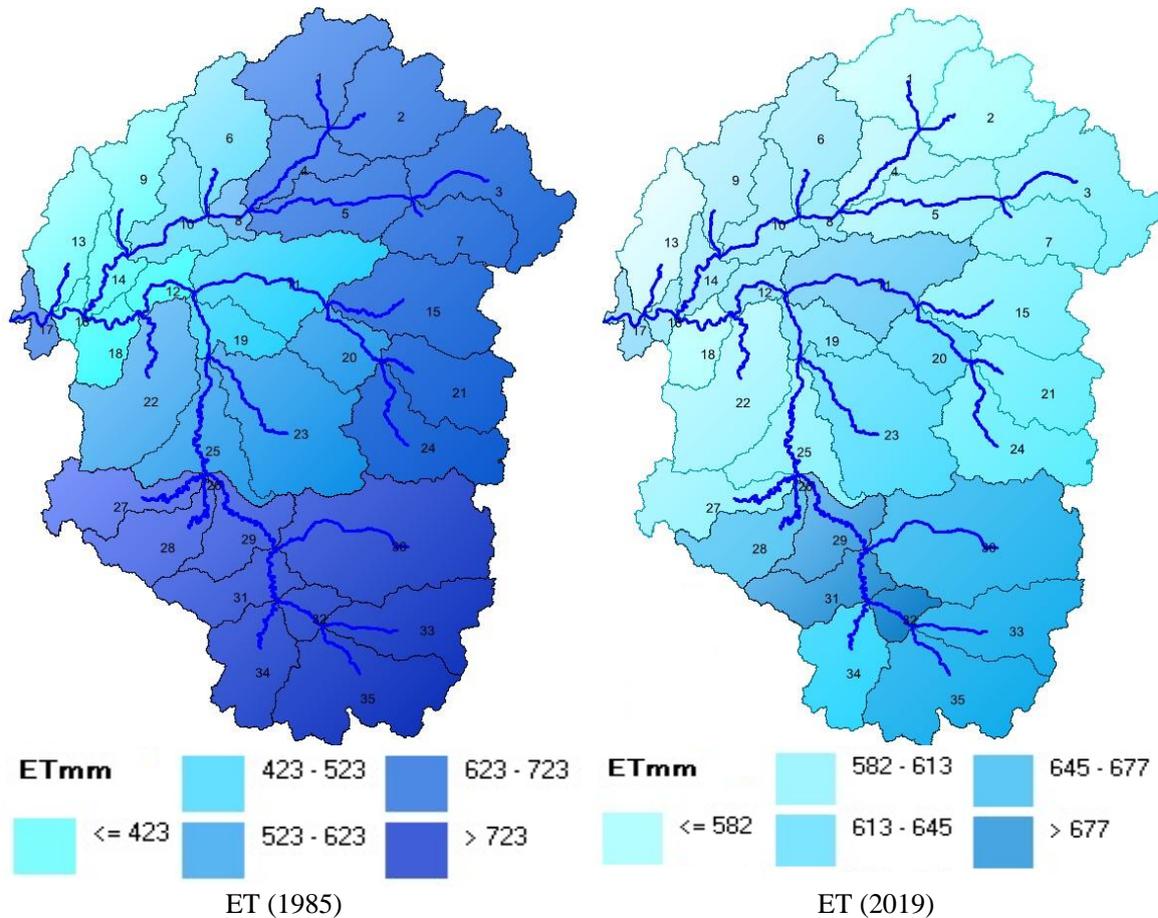


Figura 4.9 Mudança sensata da evapotranspiração simulado por sub-bacia
Figure 4.9 Sensible change in evapotranspiration simulated by sub-basin
 Fonte: Os autores (2022)

4.2.6 Conclusões

A abordagem utilizada neste estudo identificou as contribuições das mudanças de LULC nos componentes hidrológicos, fornecendo bases quantitativas que podem ser utilizadas por estudiosos, técnicos e gestores públicos fazerem uso de melhorias para o planejamento da área da bacia e gestão dos recursos naturais, principalmente os hidrológicos.

Concluiu-se que as hipóteses as mudanças de LULC da classe PAST sob a hidrologia da bacia, tem influenciado especialmente o sistema cárstico, podendo ser previstos pelo SWAT para descrever tais processos. Enquanto a substituição de áreas de floresta para criação de terra de pastagens aliada ao processo de urbanização, for o maior contribuinte para a diminuição do fluxo de base/percolação, haverá um impacto positivo sobre a ET ao lado do SURq, afetando os sistemas cársticos da região e dos recursos hídricos locais.

As áreas de pasto, massa d'água, formações savânicas e campestre na bacia aumentaram, enquanto as áreas de campo cultivado, floresta e área urbana diminuíram ao longo do período estudado. A proporção da transformação entre campo cultivado, pastagem, e floresta é quase equilibrada nos últimos 34 anos. Mudanças consideráveis de melhorias para o ecossistema ocorreram na cobertura da terra por causa do desempenho de projetos ecológicos, como a ANRV e APA Simolândia na virada do milênio. A APA na bacia também obteve um bom efeianrv

- A aplicabilidade do modelo SWAT à bacia foi melhorada através de análises de sensibilidade e calibração de parâmetros. O volume de escoamento total superficial médio simulado é maior no Leste e mais baixo no Nordeste da bacia.
- O escoamento superficial demonstra notável heterogeneidade espacial, e o valor total é relativamente baixo. Há abundante escoamento subterrâneo, que está intimamente relacionado com as estruturas hidrográficas topograficamente binárias, de superfície-subsuperfície. Elevações mais altas e encostas mais íngremes aumentam as porcentagens de escoamento total e escoamento subterrâneo.

- A hipótese do trabalho de pesquisa foi confirmada, porém de forma qualitativa, com a ressalva da necessidade de álgebra de mapas adicionais para aprimorar as correlações e estimativas geradas. A análise de sensibilidade permitiu a identificação dos parâmetros mais significativos para a simulação da vazão com o modelo SWAT, e indicou que os parâmetros mais sensíveis na modelagem na ABRC são similares aos encontrados em outros estudos, realizados em bacias na região Centro-Oeste.

É importante ressaltar que, durante o período pandêmico do coronavírus (COVID-19), fez-se reajustes no projeto inicial da pesquisa, absteve-se de dados importantes de campo, resultando nos fracos índices estatísticos, e que, com dados específicos, os resultados do modelo tendem a ser melhorados.

Deste modo, Wang e Brubaker (2014) modelaram tanto em qualidade quanto em quantidade, resultando em uma discussão da melhor estimativa da vazão para esse tipo de geomorfologia.

No modelo não linear (adaptado), discutem que apresentou melhora nos valores, sendo que o modelo SWAT original, é imparcial, os autores alertam que o GWq é calculado usando um modelo de reservatório linear, com vazão proporcional ao do armazenamento, podendo resultar em um NSE baixíssimo devido às características genéticas da rocha calcária.

Além disso, o coeficiente de eficiência NSE é sensível a vários fatores, tais como: tamanho da amostra, composição do maciço, vies de magnitude e vies de compensação de tempo, contudo ainda pode ser um julgamento de ajuste de bons resultados, desde que possa ser interpretado corretamente (WANG; BRUBAKER, 2014). Portanto, um NSE negativo pode não significar necessariamente como um modelo ruim e não pode ser usado como um índice único para avaliação do modelo para esse tipo de formação.

Portanto, o uso do SWAT se mostrou complexo e carece de uma série de dados detalhados relacionados ao cenário específico do projeto de gestão da água, de operação de reservatório, de qualidade hídrica (variáveis físicas, químicas e microbiológicas), agroquímicas (padrão de cultivos, colheita, pesticidas, fertilizantes etc.), irrigação, geração de energia (PCH), e ainda físicas como dados das características geológicas, de fratura/fissuras, sumidouros, dolinas que podem ser inseridas no modelo como lagoas.

Para Neitsch et al. (2011), o modelo só considera a profundidade dos solos até 350cm, fator que embute as incertezas, os erros na rotina hídrica, de sedimento e por efeito, nas respostas de saída do modelo.

Muitos dados não são disponibilizados para a realidade das bacias brasileiras e o uso de dados no *default* do SWAT de referência, são alternativas viáveis de aplicação e foram estudadas para outros tipos de feição, sem se aprofundar na cárstica.

Os dados da vazão simulada, acompanhou a tendência da vazão observada. É possível que um período menor na modelagem, minimize boa parte das incertezas.

Outra medida a ser tomada para tentar melhorar a eficiência da simulação é realizar a calibração por subbacia, contudo existe apenas uma estação hidrológica dentro da bacia, com dados diários de vazão.

Ressalta-se que foram desconsiderados elementos importantes podendo agregar erros nas previsões do o balanço hídrico, como os dados de reservatórios e de demanda hídrica associados à irrigação.

Para realizar ajustes diretamente na interface do ArcSWAT, é importante o conhecimento da linguagem de programação Fortran, código fonte desse modelo. Assim, uma superestimativa nas respostas do modelo é atribuída a incompatibilidade do ciclo de crescimento das plantas, na sub-rotina do arquivo *dormant.f*, da variável *ALAI_MIN*, constar o período de dormência das plantas programado pelo SWAT, com a vegetação do Cerrado Brasileiro.

Outra modificação recomendada para que se consiga melhorar o desempenho é criar partições no GWq profundo para feições com rochas calcárias, pois no algoritmo SWAT original, gerou-se o fluxo de base a partir da quantidade de água total infiltrada pelas camadas do solo, não permitindo a liberação imediata para o GWq profundo. Após a sugerida modificação do modelo, são necessários estudos no intuito de verificar como os componentes hidrológicos simulados, se comportam em relação à referida modificação.

Por fim, essa abordagem fornece um exemplo sólido de integração de modelagem hidrológica, para poder-se identificar a dinâmica das mudanças de LULC, de modo a constatar a conexão entre o padrão da geração de escoamento, fatores ambientais e antrópicos sob gradientes no relevo cárstico, contudo, não foi focado nesta pesquisa, a melhora dos índices estatísticos para a feição cárstica de desempenho do modelo, porém foi indicado os parâmetros e variáveis dos *input's* pré-existentes, como uma contribuição. Ele pode ser utilizado em várias bacias hidrográficas, onde os mapas de uso da terra multitemporais e de solos, estão disponíveis.

4.3 DESAFIOS NA CORRELAÇÃO ENTRE OS FATORES AMBIENTAIS E O PADRÃO DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO NO TRECHO SUPERIOR DA BACIA DO RIO CORRENTE (GO)

4.3.1 Apresentação

Com base nos resultados alcançados durante as diversas fases da pesquisa, o presente artigo submetido à Revista Sociedade e Natureza da UFU compreende um estudo de caso sobre o padrão da geração do escoamento na bacia. Ele abrange os materiais e os métodos envolvidos na pesquisa, aborda a eficácia de produtos de modelagem, identificando por meio de simulação, os impactos ambientais e antrópicos decorrentes das mudanças de LULC na bacia.

ARTIGO III

*sociedade
& natureza*

Desafios na correlação entre os fatores ambientais e o padrão da geração de escoamento no trecho superior da Bacia do Rio Corrente (GO)

Challenges in the correlation between environmental factors and the pattern of runoff generation in the upper reaches of the Corrente River Basin (GO)

Ludmagna Pereira de Araújo
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Distrito Federal, Brasil
ludmagna@hotmail.com

Ruth Elias de Paula Laranja
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Distrito Federal, Brasil
laranja.ruth@unb.br

Venerando Eustáquio Amaro
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
venerando.amaro@gmail.com

Michael Vandesteen Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
michael.souto@geologia.ufrn.br

Antonio Marozzi Righetto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
magalybezerra20@yahoo.com.br

Palavras-chave: Uso da Terra; Modelagem Hidrológica; Sedimento; SWATCUP; Índice Topográfico

Resumo

Os impactos das mudanças de Uso da Terra/Cobertura do Solo (LULC) em uma bacia hidrográfica acarretam danos à oferta d'água para o abastecimento da população, assim como a biodiversidade e às cavernas da região. Nesta perspectiva, objetivou-se elaborar uma proposta metodológica para analisar o impacto das mudanças de LULC e índices topográficos sobre a hidrologia de uma bacia agrícola com feição cárstica do bioma Cerrado, intensamente monitorada, a partir do uso de técnicas de sensoriamento remoto nos períodos de 1985 e 2019 com base no *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). A metodologia foi testada na porção alta da Bacia do Rio Corrente (ABRC), no estado de Goiás e consistiu na: 1) classificação de LULC e avaliação da precisão; 2) na modelagem hidrológica. Para a análise dos dados de LULC, buscou-se com o Coeficiente de Correlação de Pearson (R) avaliar o padrão espacial da geração do escoamento superficial (SURq), de subsuperfície (GWq) e evapotranspiração (ET) a partir dos dados simulados pelo modelo. Como resultado, constatou-se que: o ET e o SURq estão associados aos fatores antrópicos e.g. pasto e área urbana, assim como em elevações mais altas e nas encostas mais íngremes, aumentando as porcentagens de SURq, o que pode agravar um problema ambiental, pois, gera-se mais erosão, sedimentos, fissuras nas rochas calcárias e inundação nas áreas de cavernas. Constatou-se que áreas de florestas com estruturas hidrográficas envolvendo topografias binárias, de superfície-subsuperfície e de elevação afetam o GWq como um fator dominante nas regiões de cabeceira, com cotas inferiores e a jusante da bacia. Concluiu-se que, a estruturação da abordagem é consistente aos efeitos analisados, se observar o ajuste à realidade local, podendo ser aplicada a outras áreas.

Keywords: Land use; Hydrological Modeling; Sediment; SWATCUP; Topographic Index.

Abstract

The impacts of Land Use/Land Cover (LULC) changes in a watershed cause damage to the water supply to supply the population, as well as the biodiversity and caves in the region. In this perspective, the objective was to elaborate a methodological proposal to analyze the impact of LULC changes and topographic indices on the hydrology of an agricultural basin with a typical karst feature of the Cerrado bioma, intensively monitored, from the use of remote sensing techniques in the periods 1985 and 2019 based on the *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). The methodology was tested in the upper portion of the Rio Corrente Basin (ABRC), state of Goiás, and consisted of: 1) LULC classification and accuracy assessment; 2) Hydrological modeling. For analysis, together with the field records, it was sought with the Pearson Correlation Coefficient (R) to evaluate the spatial pattern of the generation of surface runoff (SURq), subsurface runoff (GWq) and evapotranspiration (ET) from the simulated data, by the model. As a result, it was found that: ET and SURq are associated with anthropic factors e.g. pasture and urban areas as well as at higher elevations and steeper slopes, increasing the percentages of SURq, which can exacerbate an environmental problem, as it generates more erosion, sediment, cracks in limestone rocks and flooding in cave areas. It is abbreviated that forest areas with topography binary, surface-subsurface and

elevation hydrographic structures affect the GW_q as a dominant factor in the headwaters, with lower elevations and downstream of the basin. It is concluded that the structuring of the approach is consistent with the effects analyzed, if the adjustment to the local reality is observed, and can be applied to other areas.

4.3.2 Introdução

Os modelos hidráulicos auxiliam na simulação do fluxo em condutos cársticos (MALAGÒ et al., 2016), são economicamente viáveis e eficientes, servem como meio de organização, monitoramento e interpretação de dados fornece-se previsões contínuas, dos processos reais ligados à água e ao sedimento (SANTOS, 2016; ARAÚJO; FIGUEIREDO; SOUTO, 2022).

Além disso, dada a disponibilidade limitada dos modelos hidrológicos voltados para mudanças de Uso da Terra/Cobertura do Solo, em inglês, *Land Use/Land Cover* (LULC), é difícil quantificar os impactos em uma classe individual de LULC na hidrologia (NIE et al., 2011). Apesar da influência que os componentes hidrológicos causam em cada classe de LULC ajudam os tomadores de decisões na gestão da bacia quanto à previsão dos impactos ambientais em determinada porção da bacia (NIE et al., 2011; TIAN et al., 2016; SAMAL; GEDAM, 2021).

Segundo Neitsch et al. (2011) algumas concepções sobre o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) com aplicação em áreas que envolvem as mudanças de LULC, favorecem a realização de análises dos componentes hidrológicos, devido à simplicidade no manuseio e método de cálculo desse modelo (SAMAL; GEDAM, 2021). Desse modo, o SWAT é mais indicado porque tem apoio em processos hidrológicos, facilitando a obtenção dos parâmetros, pelos quais vem se tornando uma alternativa viável, com baixo custo financeiro, quando comparado com outros modelos hidrológicos (distribuídos e conceituais) (NEITSCH et al., 2011; MALAGÒ et al., 2016).

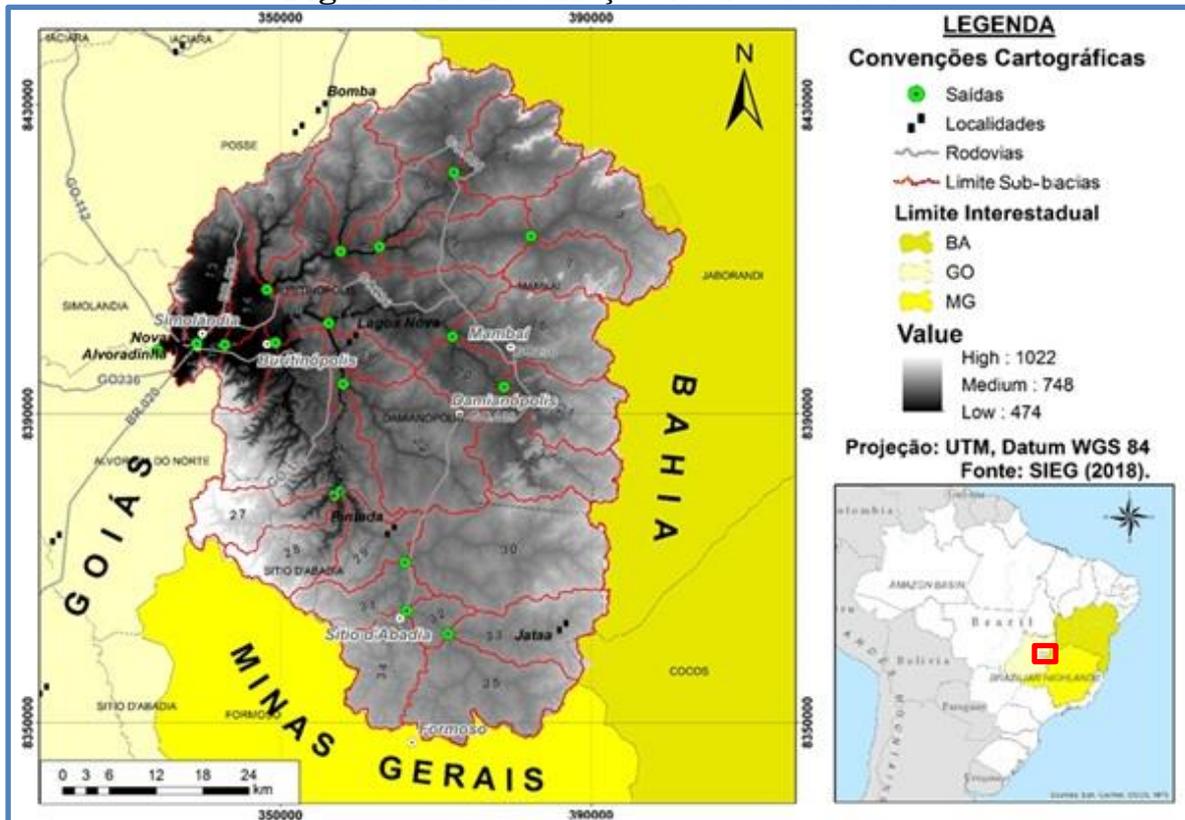
Somado a essas características, as propostas metodológicas sobre a análise qualitativa da geração de escoamento em ecossistema cárstico com variação espacial, são escassas na literatura (TIAN et al., 2016; HOU; GAO, 2019). Algumas fórmulas empíricas e métodos equivalentes de valor não consideram mecanismos físicos e padrões espaciais dos volumes do escoamento superficial, que deve ser o foco principal em áreas cársticas, com alta fragmentação da paisagem (HOU; GAO, 2019).

Vários estudos foram realizados sobre a aplicação do modelo SWAT nas paisagens cársticas a partir de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) à nível internacional, e.g.: Nie et al. (2011) e Samal e Gedam (2021) que descreveram teoricamente sobre as adaptações do modelo SWAT para a feição cárstica.

Nie et al. (2011) e Samal e Gedam (2021) avaliaram o impacto das mudanças de LULC na hidrologia a partir do SWAT com vistas à gestão de bacias hidrográficas e restauração ecológica. Sobre consultas à alguns trabalhos no bioma Cerrado, destacamos: Lima et al. (2013), Ferrigo (2014) e Santos (2016) que utilizaram parâmetros e variáveis de entrada no modelo com às características da realidade local, necessários para a simulação.

A extensão geográfica da ABRC compreende as coordenadas geográficas, latitudes $-14^{\circ} 56' 34''$; $-14^{\circ} 08' 42''$ N e longitudes $-45^{\circ} 51' 05''$; $-46^{\circ} 31' 20''$ W, cobrindo-se uma área de 3.847.13 km² (Figura 4.10).

Figura 4.10 Localização da área estudada



Fonte: Os autores (2022)

A contribuição deste artigo é apresentar em língua portuguesa, o efeito de uma pesquisa desenvolvida à nível de doutorado, pois trata-se de uma formulação atualizada. O mesmo ainda não foi totalmente testado no Cerrado Brasileiro sob condições geomorfológicas especiais frágeis (rochas calcárias) interligadas a sistemas hidrológicos de superfície e subsuperfície. Diante do exposto, foi apresentada uma proposta metodológica a partir do modelo SWAT, para identificar o impacto das mudanças de LULC em uma hidrologia com aspectos tipicamente cársticos, sob diversos gradientes de elevação, no período de 1985 e 2019 na porção alta da Bacia do Rio Corrente, aqui apelidada ABRC.

Para atingir este objetivo foram utilizados princípios da modelagem hidrológica no levantamento de dados bibliográficos e cartográficos, de LULC, assim como simulações, técnicas estatísticas de análise das informações levantadas, de maneira a identificar as mudanças e criar hipóteses a respeito da influência antrópica no padrão espacial do escoamento.

4.3.3 Materiais e métodos de modelagem

Esta metodologia baseou-se em duas partes, à saber: 1) Classificação LULC; 2) Modelagem hidrológica (**Figura 4.11**).

Figura 4.11 Fluxograma para análise dos impactos de mudança de LULC sob a hidrologia cárstica



Fonte: adaptado de Samal e Gedam (2021)

O fluxograma da **Figura 4.11** para análise dos impactos de mudança de LULC sob a hidrologia cárstica, compreende na:

- Classificação LULC** para deteção das mudanças e análise da precisão dos produtos do MapBiomás correspondente aos anos de 1985 e 2019;
- Modelagem do fluxo** englobou as etapas do processamento manual da simulação inicial no SWAT e, automática no SWAT-*Calibration and Uncertainty Program* (SWATCUP, Programa de Calibração e Incerteza - tradução livre), constitui-se no aquecimento, calibração e validação do modelo. Do produto da simulação foram analisados os impactos das mudanças de LULC com respostas hidrológicas usado pelo SWAT.

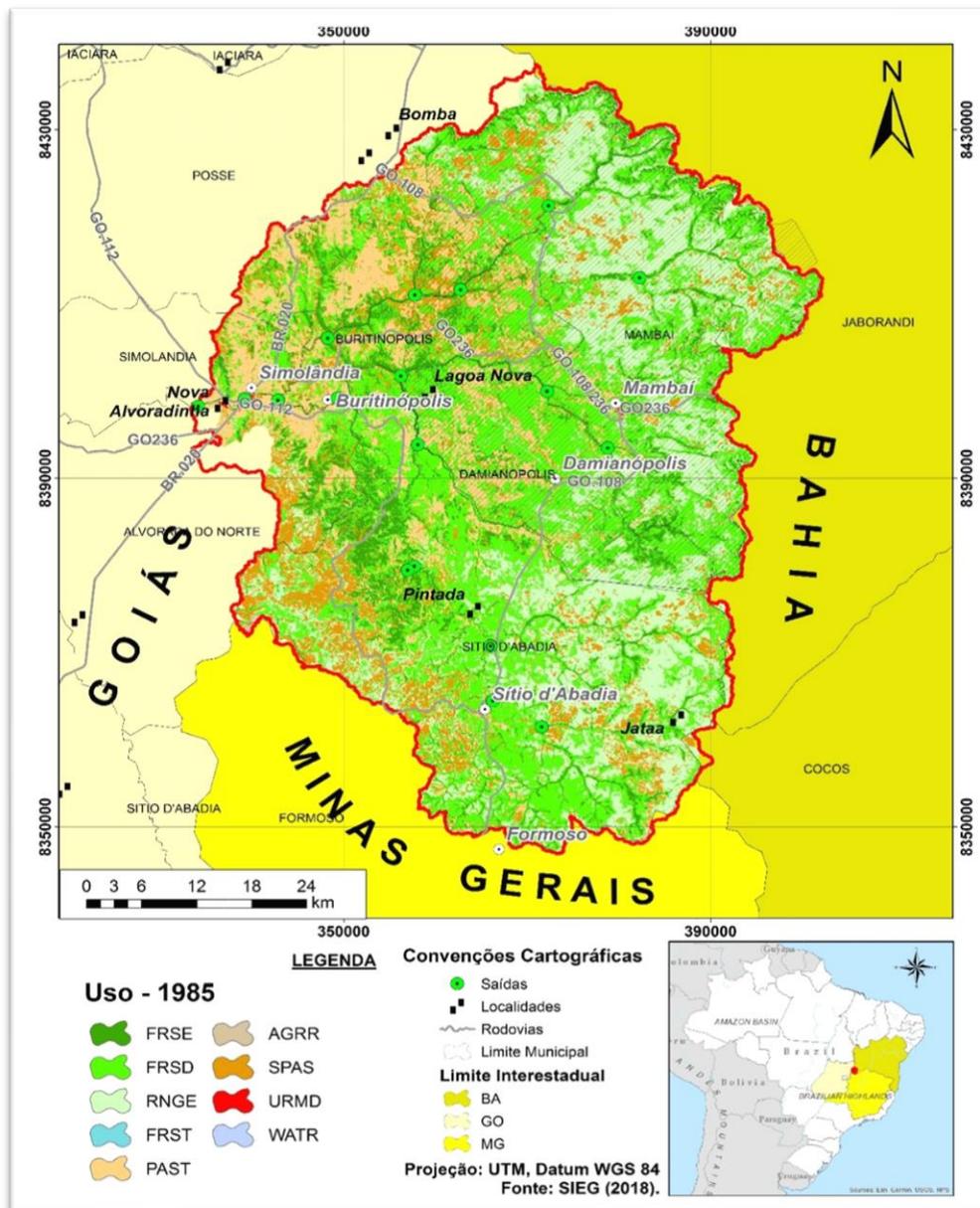
No entanto, os **dados de entrada** no modelo contêm informações espaciais dos parâmetros físicos (DEM, LULC e tipos de solo) e das variáveis climáticas, solicitadas pelo modelo, porém parte destes dados, são inseridos pelas tabelas (*.mdb), à saber: Crop, UserSoil e WGEN no *default* do SWAT; conforme a necessidade do projeto após uma reanálise. Deste modo, na fase da discretização

da bacia, são solicitados dados de Ottobacias pertinentes à distribuição do fluxo na bacia.

4.3.3.1 Classificação do LULC e avaliação da precisão

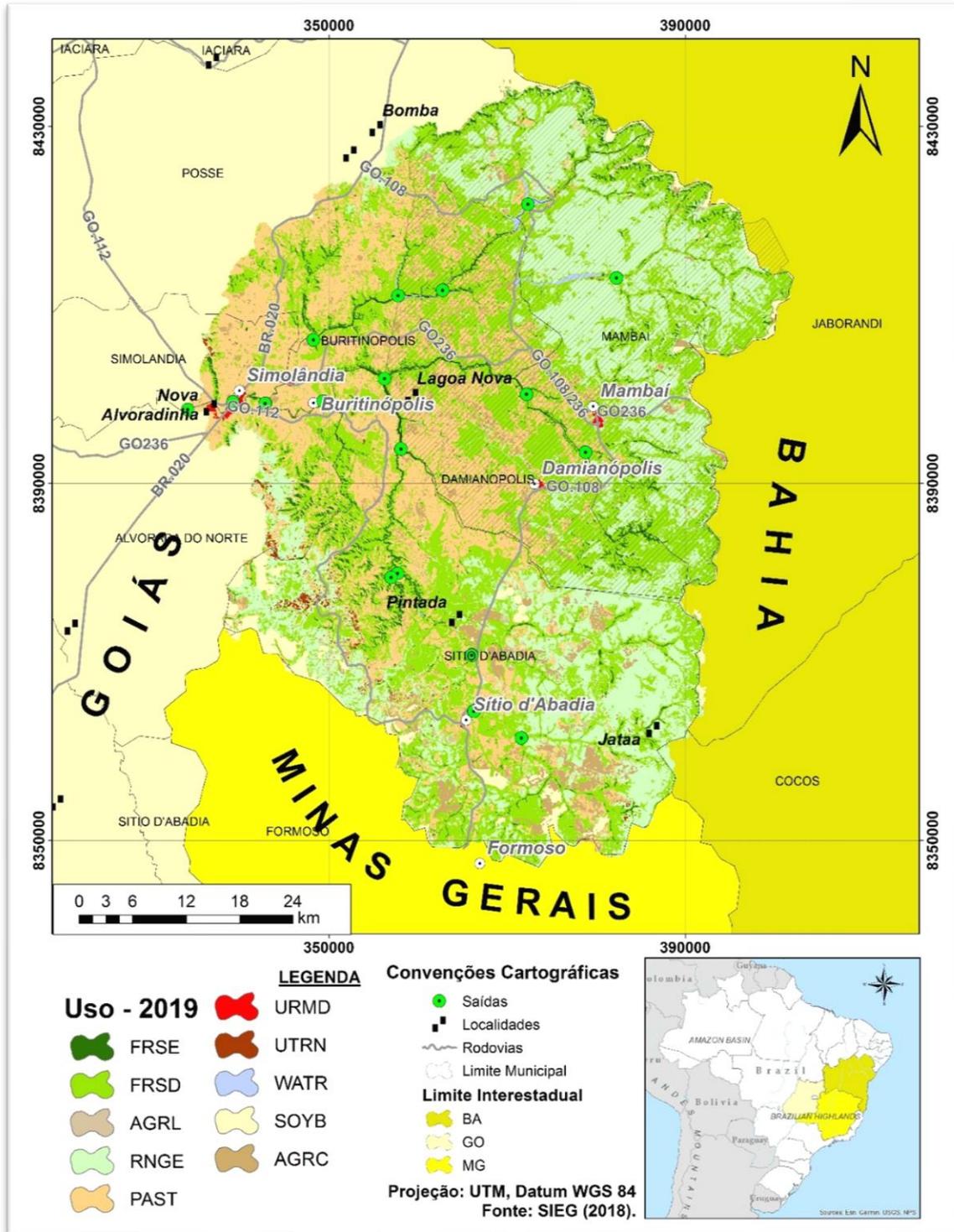
Os mapas históricos de LULC da área de estudo correspondentes aos dois períodos já mencionados, foram obtidos a partir do arquivo matricial (*raster*) do MapBiomas (2022), Bioma Cerrado, Coleção 3 e Coleção 5 (Figura 4.12 e Figura 4.13).

Figura 4.12 Mapa de LULC, período de 1985



Fonte: Os autores (2022)

Figura 4.13 Mapa de LULC, período de 2019

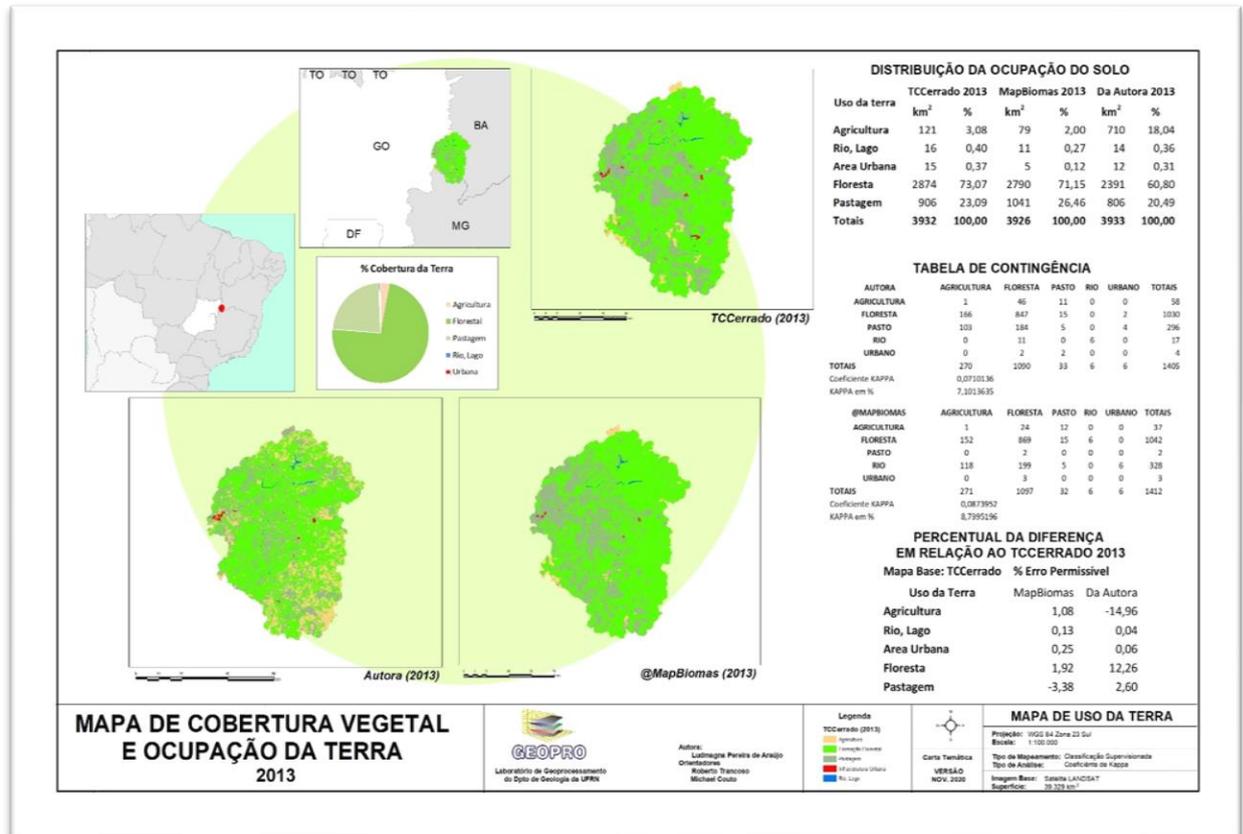


Fonte: Os autores (2022)

Destarte, a precisão do mapa de LULC do MapBiomass e dos Autores foi avaliada a partir das referências do produto validado do projeto TCCerrado do BRASIL (2015), das amostras obtidas em campo e, uma matriz de confusão foi preparada (Figura 4.14).

Nas tabelas apresentam os dados referentes ao ano de 2013, coeficiente kappa e tabela de contingência com registros das frequências das amostras observadas por classes de uso, de forma qualitativa.

Figura 4.14 Amostras comparativas dos Autores, BRASIL (2015) e MapBiomas (2022)



Fonte: Os autores (2022)

Uma matriz de transferência foi preparada para identificar as mudanças, porém é difícil avaliar a precisão de mapas de LULC multitemporais devido à falta de verificação do terreno (SAMAL; GEDAM, 2021).

Assim sendo, a precisão do mapa de LULC que foi avaliada, reflete na precisão geral de outros mapas. As amostras das visitas de campo foram usadas, coletadas em maio de 2019 e, preparadas em uma matriz de confusão. Como os mapas de LULC carregam informações históricas, vários conjuntos de dados secundários, como mapas de LULC do projeto TCCerrado (BRASIL, 2015) do ano de 2013, foram usados como referência para validação.

Com as informações dos mapas de LULC e comportamento da hidrologia quantificadas de acordo com sua dimensão espacial, no *software* estatístico JAMOVI (2022) aplicou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP), de forma aleatória entre as variáveis dependentes medidas, visando saber se uma medida numérica/quantitativa tem relação com a outra, que obedecem a parâmetros normais de distribuição (SAMAL; GEDAM, 2021).

Como finalidade, os valores foram marcados com tons que variam de acordo com a intensidade da correlação (**Quadro 4.1**), sendo em tons azulados

para os positivos, referente ao crescimento proporcional das feições, amarelado para os negativos, do crescimento inversamente proporcional e branco para os nulos.

Quadro 4.1 Valores padrão de correlação das feições

Nº	Coefficiente de correlação	Correlação
1	$r = 1$	Perfeita positiva
2	$0,8 \leq r < 1$	Forte positiva
3	$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
4	$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
5	$0 \leq r < 0,1$	Ínfima positiva
6	0	Nula
7	$-0,1 < r \leq 0$	Ínfima negativa
8	$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca negativa
9	$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada negativa
10	$-1 < r \leq -0,8$	Forte negativa
11	$r = -1$	Perfeita negativa

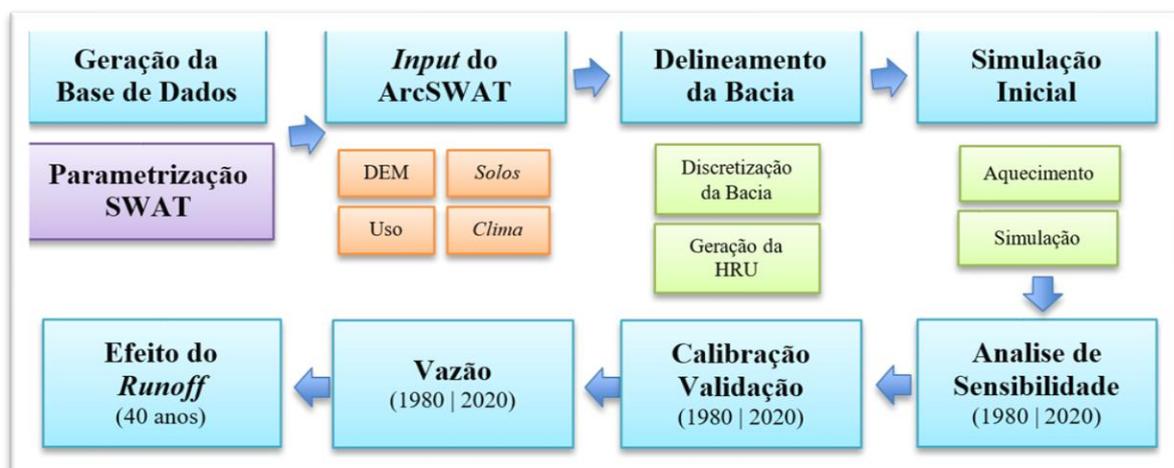
Fonte: adaptado de Samal e Gedam (2021)

A classificação dos intervalos partiu da análise junto à simulação e de consulta à literatura, de modo a comparar e explicar as informações da correlação e levantar hipóteses sobre a dinâmica dos processos atuantes na bacia.

4.3.3.2 A modelagem e suas etapas

O SWAT é um modelo hidrológico desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold em 1996 no *Agricultural Research Service* (ARS), em português, Serviço de Pesquisa Agrícola, em parceria com Texas A. & M. *University College Station* (TAMU), bastante aplicado para avaliar os processos hidrológicos e de sedimentos na previsão de impactos nas mudanças de LULC sobre a hidrologia em pequenas bacias experimentais. Por conseguinte, a **Figura 4.15** resume o processo conduzido neste trabalho na bacia.

Figura 4.15 Fluxograma das etapas de modelagem nesta pesquisa



Fonte: Os autores (2022)

Nesse cenário, o delineamento adotado na pesquisa, procedeu de forma qualitativa. Pela mesma razão, o processo de modelagem hidrológica no modelo inicia-se pela preparação dos *input's*, configuração do modelo, simulação por etapas, aquecimento, calibração, verificação preliminar dos componentes do ciclo hidrológico voltados para a geração do escoamento na bacia, a partir da aplicação do modelo.

1) Digital Elevation Model (DEM): Imagens do satélite ALOS PALSAR (Figura 4.10 e Quadro 4.2)

Quadro 4.2 Descrição dos conjuntos de dados de entrada no modelo.

Nº	INPUT	BASE	OBSERVAÇÃO
1	Digital Elevation Model (DEM)	ALOS PALSAR (2022) de 2011, a partir do <i>Alaska Satellite Facility</i> (ASF), <i>United States Geological Survey</i> (USGS) e EarthData (NASA). Com 12,5 m de resolução e mosaico de duas quadrículas, ALPSRP267816890 e ALPSRP267816880. Para os dois períodos, foram delineadas 35 subbacias, com área mínima 1.880 km ² .	Na subbacia 17 está localizada a estação de medição da vazão da bacia. A posteriori, é configurada a declividade com 05 (cinco) classes gerada no SWAT, após a inclusão do uso do solo e dos dados de solos, para definição das 420 e 540 HRU. Após as etapas anteriores, o SWAT pede para definir a menor fração da HRU. Para este estudo, optou-se por uma definição de múltiplas HRU's, acionando o comando de sobreposição dos dados de sensoriamento remoto de entrada com as características da bacia mais os valores de supressão das áreas.
2	LULC	Dados de sensoriamento remoto de 1985 e 2019 tiveram como base comum, imagens LANDSAT. Foram classificados pelos Autores a partir da imagem LANDSAT 5 e 8. Em paralelo, após comparação, optou-se pelos produtos MapBiomias nos referidos períodos.	Foi utilizado outro produto validado com base no LANDSAT, o TCCerrado do BRASIL (2015). O coeficiente kappa foi utilizado para validar esses produtos gerados durante ensaios da pesquisa. Por fim, foi escolhido o mosaico do bioma Cerrado na escala 1:100.000 do Mapbiomas. Os dados foram incorporados ao banco de dados do SWAT e configurada com o tipo de classe de uso específico predominante, conforme rotina no <i>input</i> do modelo.
3	SOLO	Mapa base do IBGE (2022), na escala 1:250.000, dos “tipos de solos do Brasil”, com as principais propriedades de cada tipo de solo para inserção no banco de dados <i>input</i> do modelo.	Dados da profundidade física (percentual de volume de cascalho, areia/silte/argila, umidade efetiva) e propriedades químicas (carbono orgânico e cátion, capacidade de intercâmbio) coletadas de publicações relevantes e pesquisas realizadas para o mesmo local de estudo. Os tipos de solos predominantes estão classificados nos grupos hidrológicos A e D conforme o sistema de classificação hidrológica de solos do <i>United States Department of Agriculture</i> (USDA); a profundidade máxima do solo (SOL_Z) varia de 200mm a 3.500mm; a condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K) varia de 0.0 a 874mm/h.
4	METEOROLÓGICOS	Foram consultados no BDMEP do INMET (2022), na rede de estações do AGRITEMPO (2022) e no <i>Global Weather Data</i> (SWAT, 2022)	Os dados meteorológicos/pluviométricos foram reanalisados previamente, para preparar a simulação, sendo interpolados e agregados por subbacia. Selecionou-se 17 estações com dados de precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação e

Nº	INPUT	BASE	OBSERVAÇÃO
			velocidade do vento (1980-2020) destas 06 (seis) estão contidas dentro da bacia.
5	HIDROLÓGICOS	Dados de vazão mensais medidos da estação do sistema HIDROWEB da ANA. Para consistência dos dados, foi utilizado o manual da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2012)	Após a reanálise dos os dados observados de 03 (três) estações hidrológicas foram comparadas com os dados simulados no SWATCUP, destas apenas Alvorada do Norte (3421) está situada dentro da bacia.

Fonte: Os autores (2022)

- 2) **LULC**: Estes mapas históricos foram obtidos a partir do arquivo matricial (*raster*) do MapBiomas (2022) idêntico a **Quadro 4.2** e **Tabela 4.8**.

Tabela 4.8 Classes de LULC para inserção no modelo por período

SWAT Classes	Classes de LULC	Percentual %	
		1985	2019
FRSE	Fm Florestal - Mata de Galeria	9,72	2,96
FRSD	Fm Savânica - Cerrado	37,24	38,07
AGRL	Floresta plantada	-	0,06
RNGE	Fm Campestre - Campo	26,25	27,15
FRST	Outra formação	0,01	-
PAST	Pecuária	11,74	23,38
SPAS	Mosaico de Agricultura	11,9	-
URMD	Infraestrutura Urbana	0,04	0,18
UTRN	Outra área não vegetada	-	0,37
WATR	Rio, Lago	0,04	0,28
AGRR	Cultura Anual e Perene - de fileiras	0,03	-
SOYB	Soja	-	2,42
AGRC	Outras lavouras temporárias	3,05	5,13
	TOTAL	100	100

Fm: Formação

Fonte: Os autores (2022)

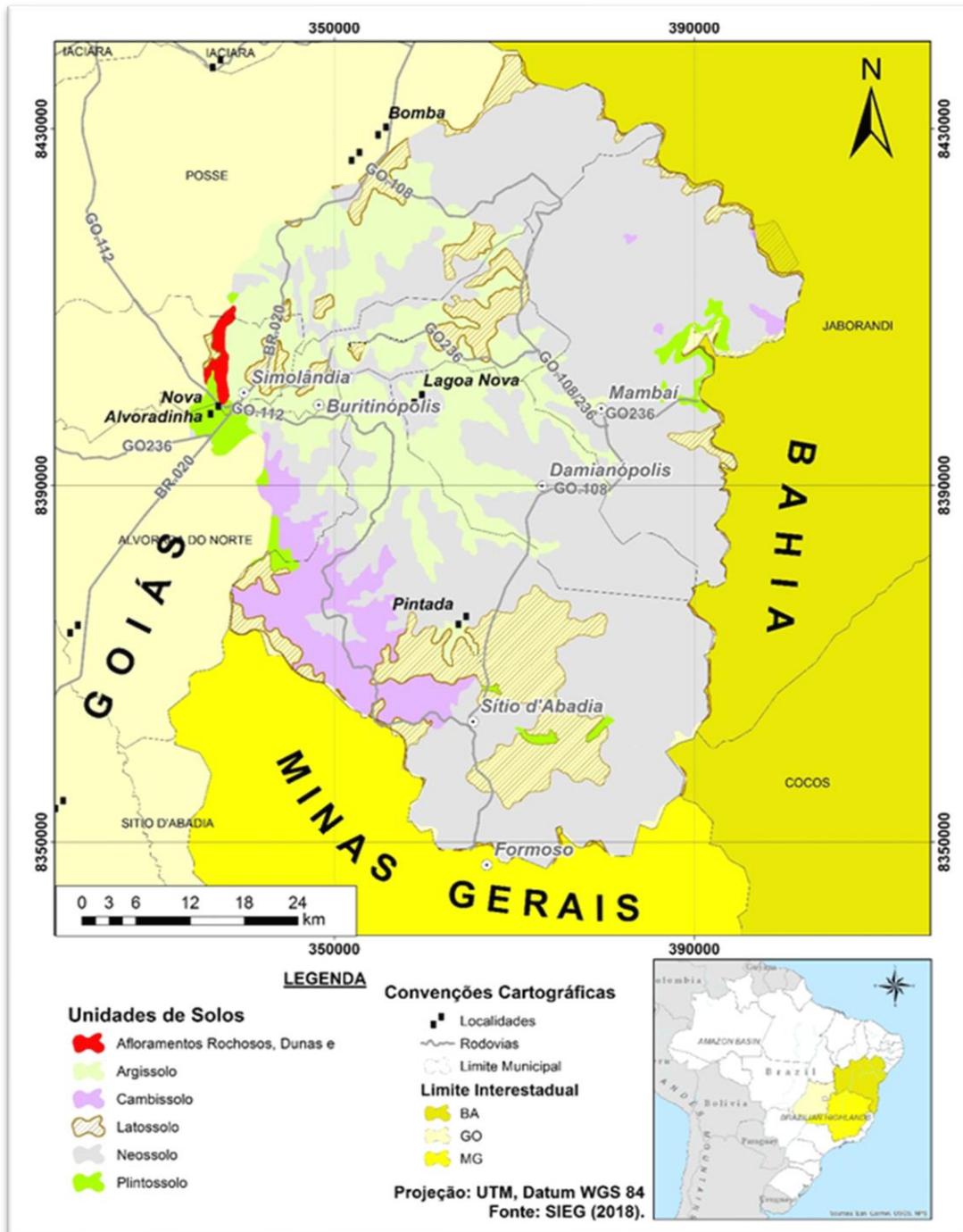
- 3) **SOLO**: O mapa de solo foi coletado na plataforma do IBGE (2022), dos “tipos de solos do Brasil” (**Tabela 4.9** e **Figura 4.16**)

Tabela 4.9 Dados das classes de solos para a inserção no modelo

CLASSE	SNAM SWAT	%
Afloramentos rochosos	AFLR	0,34
Argissolos	ARG	19,21
Cambissolo	CX	6,45
Latossolos	LV	12,72
Neossolos	RQ	59,25
Plintossolo	FX	2,04
TOTAL		100

Fonte: Os autores (2022)

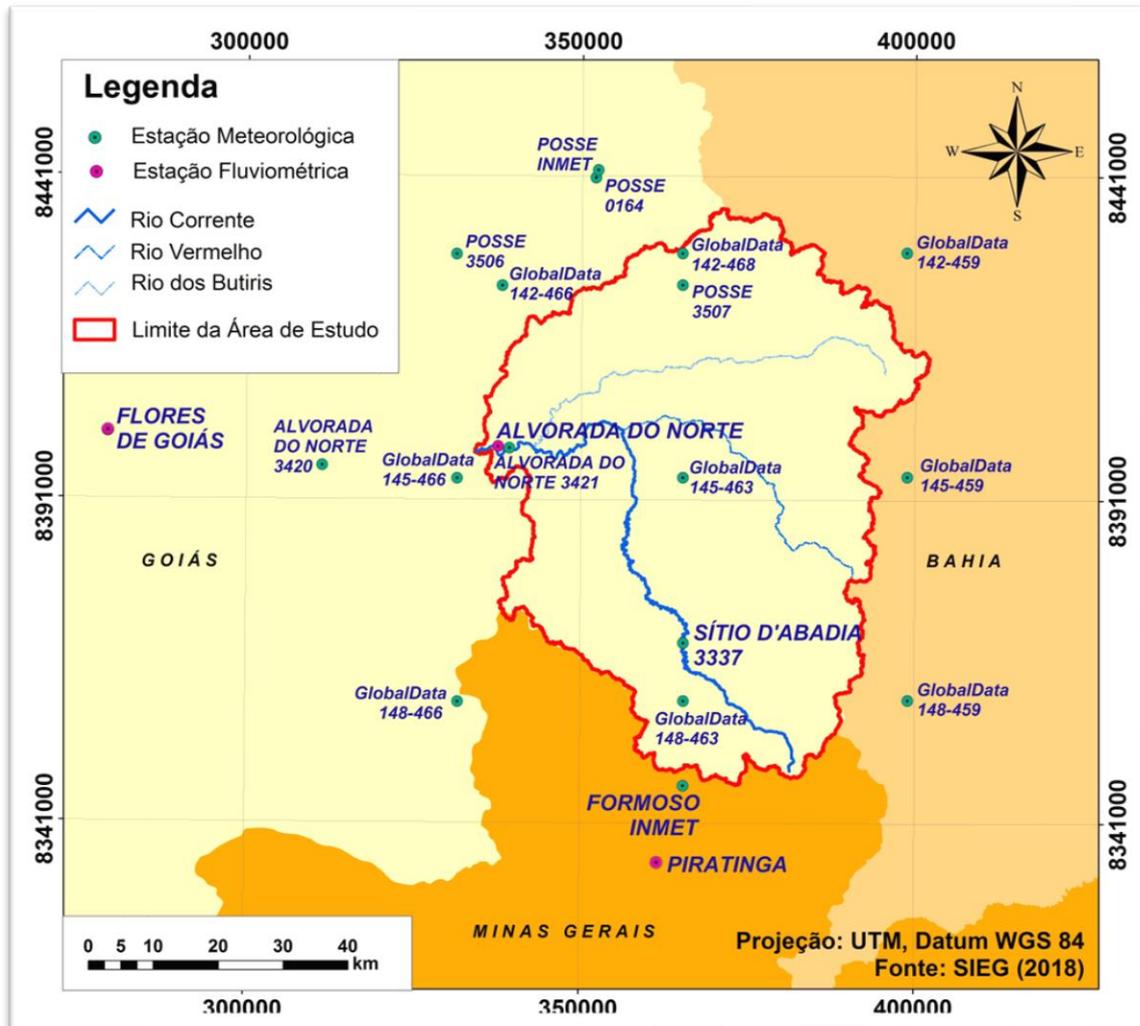
Figura 4.16 Mapa com a representação dos tipos de solos



Fonte: Os autores (2022)

- 4) **DADOS METEOROLÓGICOS:** Os dados foram reanalisados previamente das medições mensais das estações de precipitação e organizados em tabelas conforme manual do SWAT (Figura 4.17). Para consistência dos dados, foi utilizado o manual da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2012), conforme representado nos gráficos das Figura 4.18, Figura 4.19 e Tabela 4.10.

Figura 4.17 Mapa das estações meteorológicas e hidrológicas do modelo



Fonte: Os autores (2022)

Figura 4.18 Dados médios mensais das estações do INMET e AGRITEMPO

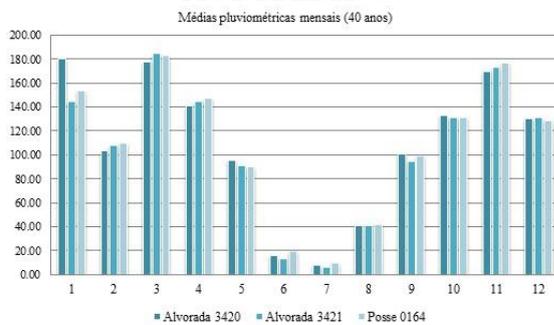
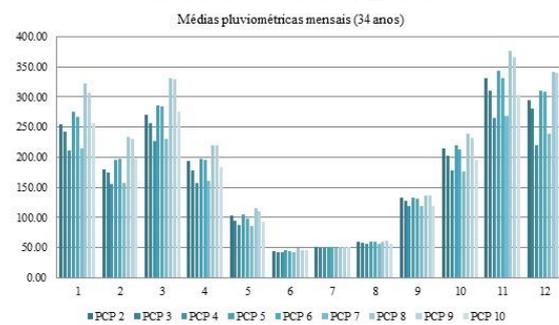


Figura 4.19 Valores mensais dos postos pluviométricos do GlobalWeatherData



Fonte: Os autores (2022)

Tabela 4.10 Dados climáticos da Estação Posse - 9000164 usados no modelo¹

PARÂMETRO/ MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	28,78	28,95	29,09	29	28,88	28,32	28,44	29,78	31,79	32,61	30,67	29,43
TMPMN	14,69	14,52	14,65	14,86	14,67	14,56	14,73	15,6	16,37	16,01	15,15	14,68
TMPSTDMX	2,87	2,58	2,41	2,27	2,06	1,92	2,06	2,63	2,83	3,23	3,3	3,02
TMPSTDMN	5,9	5,87	5,82	5,21	4	2,87	2,49	2,89	4,14	5,55	5,98	6,31
PCPMM	176,99	118,49	212,11	174,41	150,32	43,77	48,72	84,08	198,4	209,64	214	147,06
PCPSTD	38,32	9,76	13,35	12,06	12,05	5,21	6,71	8,2	14,44	12,96	13,54	10,19
PCPSKW	35,39	4,33	3,24	3,55	4,18	5,06	6,62	4,71	3,26	2,86	3,49	3,94
PR_W1	0,16	0,2	0,26	0,24	0,19	0,08	0,06	0,11	0,18	0,24	0,29	0,15
PR_W2	0,82	0,79	0,81	0,77	0,73	0,67	0,62	0,63	0,77	0,78	0,82	0,82
PCPD	14,94	13,94	17,86	15,6	13,05	6,01	4,64	7,43	13,58	16,49	18,92	14,66
RAINHHMX	21,14	10,07	14,77	12,6	10,86	4,09	3,67	7,85	12,5	12,89	14,64	10,18

Fonte: Os autores (2022)

5) DADOS HIDROLÓGICOS: Os dados observados de 03 (três) estações hidrológicas (**Quadro 4.3** e **Figura 4.17**) foram comparadas com os dados simulados.

Quadro 4.3 Resumo das informações técnicas dos dados meteorológicos e hidrológicos

Dados	Código	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Fonte
Meteorológicos	3420	Alvorada do Norte	-14.5	-46.75	483	AGR
	3421	Alvorada do Norte	-14.5	-46.5	543	AGR
	3164	Posse	-14.1	-46.37	778	AGR
	3506	Posse	-14.25	-46.5	722	AGR
	3507	Posse	-14.25	-46.25	816	AGR
	3337	Sítio D'Abadia	-14.75	-46.25	746	AGR
	83332	Posse	-14.0891	-46.36653	830,35	INMET
	83379	Formoso	-14.9333	-46.25	778	INMET
	459	Global-142	-14.206	-45.938	880	SWAT
	463	Global-142	-14.206	-46.25	836	SWAT
	466	Global-142	-14.206	-46.563	615	SWAT
	459	Global-145	-14.519	-45.938	817	SWAT
	463	Global-145	-14.519	-46.25	605	SWAT
	466	Global-145	-14.519	-46.563	666	SWAT
	459	Global-148	-14.831	-45.938	915	SWAT
463	Global-148	-14.831	-46.25	767	SWAT	
466	Global-148	-14.831	-46.563	858	SWAT	
Hidrológicos	21300000	Alvorada do Norte	-14.4769	-46.4906	-	ANA
	21220000	Flores de Goiás	-14.4508	-47.0472	-	ANA
	43360000	Piratinga	-15.0308	-46.2925	792	ANA

Fonte: Os autores (2022)

Geração de HRU's: optou-se por uma definição de múltiplas HRU's, acionou-se o comando de sobreposição de três camadas para a determinação de polígonos com mesmas características de uso da terra/solo/inclinação na bacia com valores de supressão de áreas com: 20%, 10% e 20% respectivamente. Para incluir informações de LULC, a simulação resultou em 420 e 540 HRU's respectivamente por período.

¹ Dados relacionados à temperatura (TMPMX; TMPMN; TMPSTDMX; TMPSTDMN), precipitação (PCPMM; PCPSTD; PCPSKW; PR_W1; PR_W2; PCPD, RAINHHMX)

Simulação do modelo: Segundo Neitsch et al. (2011), as técnicas de calibração, análise de sensibilidade e incertezas são geralmente manuais ou automatizadas, assim sendo, o SWAT combina de forma manual os métodos LH-OAT (do *Latin Hypercube* - LH e o *One-Factor-At-a-Time* - OAT) (NEITSCH et al., 2011). Em seguida, a simulação procedeu-se de forma automática no SWATCUP), para comparação dos dados observados com o simulado dentro do algoritmo de otimização *Sequential Uncertainty Fitting 2* (SUFI-2) e as funções objetivo, pautou-se na avaliação do desempenho do modelo, em: 1) Coeficiente de eficiência NSE (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e no coeficiente de determinação R²; 2) Inspeção visual por hidrogramas; e, 3) Uno as incertezas previstos pelo modelo. As estatísticas do *95 Percent Prediction Uncertainty* (U95PPU), faixa de incerteza de predição de 95% dos valores do simulado e o arquivo *Summary_stat* (ABBASPOUR, 2015) refletem os resultados.

Para avançar no processo de calibração, há algumas incertezas sobre o modelo no início da simulação e de acordo com a experiência do modelador, pode-se identificar os parâmetros mais influentes para aquele tipo de bacia. Deste modo, no **Quadro 4.4** têm-se os períodos de simulação utilizados no SWAT, perfazendo assim, um total de 20 anos de simulação para cada período na bacia.

Quadro 4.4 Períodos utilizados e função detalhada da modelagem

PERÍODO	AQUECIMENTO	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
1985	01/01/1980 a 31/12/1983	01/01/1984 a 31/12/1997	01/01/1998 a 31/12/2003
2019	01/01/1997 a 31/12/2000	01/01/2001 a 31/12/2014	01/01/2015 a 31/12/2020
Anos	4 anos	14 anos	6 anos

Fonte: Os autores (2022)

Desta forma, a análise de sensibilidade foi realizada para 17 parâmetros iniciais utilizados na calibração e adaptados, segundo a literatura. Os parâmetros relacionados ao SURq indicados na calibração, foram ajustados várias vezes até os valores simulados se aproximarem dos valores medidos: ALPHA_BF, ANION_EXCL, Ch_K₂, Ch_N₂, CN₂, DEEPST, EPCO, ESCO, GW_DELAY, GW_REVAP, GWQMN, RCHRG_DP, REVAPMN, SHALLST, SOL_AWC, SOL_K e SURLAG, dos quais os mais e menos influentes são exibidos no **Quadro 4.5**.

Quadro 4.5 Parâmetros mais influentes relacionados ao SURq

Nº	Valor	Parâmetros	Descrição	Unidade	Método	Intervalo inicial
1	Mais	ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base	dias	Substituir	0.1 a 1.0
2	Mais	CN ₂	Valor da CN para a condição de umidade média do solo	adm	Multiplicar	-0.2 a 0.2
3	Mais	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/hr	Multiplicar	-1.0 a 0.8
4	Menos	ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo	adm	Multiplicar	0 a 1.0
5	Menos	GWQMN	Limite entre a profundidade da água em aquífero raso e a superfície	mm	Substituir	162 a 3388
6	Menos	REVAPMN	Nível limite da água no aquífero raso para ocorrência do "revap"	mm	Multiplicar	0.0 a 500.0
7	Menos	SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso	mm	Multiplicar	1000.0 a 5000.0

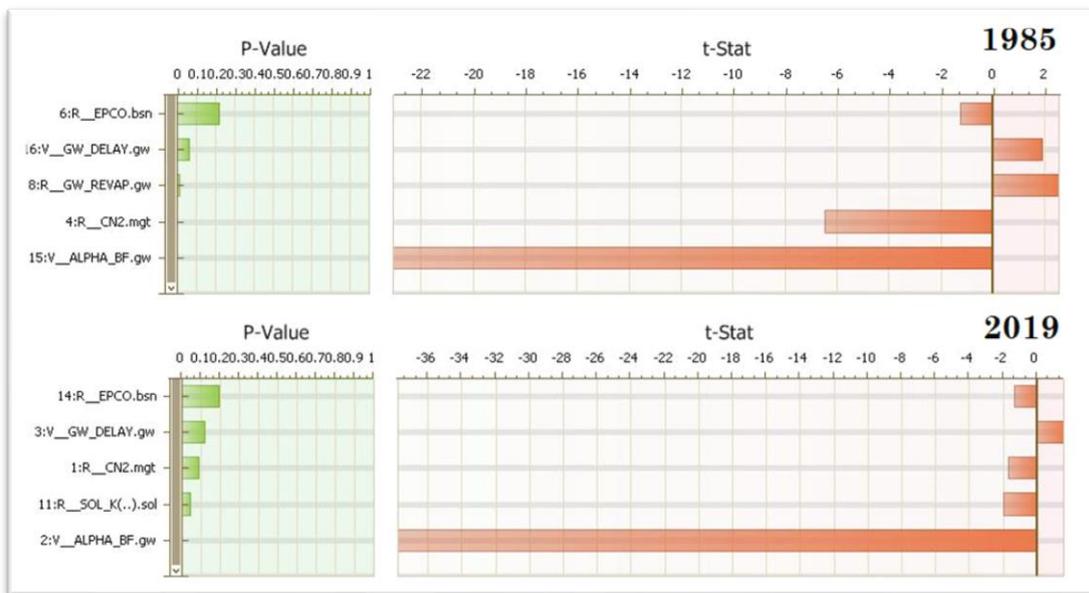
Fonte: Os autores (2022)

Deste modo, durante o período de simulação no modelo foram realizadas 100 simulações em média, totalizando seis iterações em cada ano, segundo dados observados das três estações hidrológicas mencionadas.

4.3.4 A análise estatística do modelo

Os valores finais dos parâmetros que exibiram melhores ajustes nos resultados da análise de sensibilidade global estão representados na **Figura 4.20**. Pela análise dos gráficos, percebe-se que os parâmetros ALPHA_BF e CN₂ tiveram comportamento amplamente dominante no processo.

Figura 4.20 Resultado da análise de sensibilidade a partir dos dados de vazão



Fonte: Os autores (2022)

Na literatura legitimam a dificuldade do SWATCUP em ajustar os picos de vazão e o fluxo de base em ambientes de clima tropical e subtropical como do Cerrado, tem relação com a PET superestimada no processo de modelagem pelo SWAT e, por conseguinte, excessos de volume de água no sistema.

Sugestivo aos resultados simulados por se ajustarem à modelagem de vazão mensal, os dados do modelo foram submetidos ao teste de NSE apresentado na **Equação 4.1** e R^2 , na **Equação 4.2**, conforme Abbaspour (2015).

$$NSE = 1 = \left[\frac{\sum_{t=1}^t (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^t (Q_t^{obs} - Q_t^{med})^2} \right] \quad 4.1$$

$$R^2 = \left[\frac{(\sum_{t=1}^t (Q_t^{obs} - Q_t^{med,obs})(Q_t^{obs} - Q_t^{med,sim}))^2}{\sum_{t=1}^t (Q_t^{obs} - Q_t^{med,obs})^2 \sum_{t=1}^t (Q_t^{sim} - Q_t^{med,sim})^2} \right] \quad 4.2$$

No qual, as estatísticas NSE e R^2 , resultam de Q uma variável (*e.g.*, vazão); Q^{obs} é o dado medido para o mês t ; Q^{sim} é o dado simulado (pelo SWAT) para o mês t ; e $Q^{méd}$ refere-se à média dos valores da série observada pelo número de eventos. A partir da análise dos dados simulados e observados, é possível afirmar se o modelo SWAT pode melhorar o objeto para análise da estimativa do LULC sobre os efeitos da hidrologia.

Para diversos tipos de formação geomorfológica, os valores de NSE próximos de 1, indicam que os valores da simulação estão mais próximos aos valores observados (HOU; GAO, 2019). Entretanto, há relatos sobre a dificuldade do SWAT modelar a feição cárstica e algumas incertezas sobre o modelo na simulação, foram sanadas após breve consulta à literatura.

Por diversas vezes, os parâmetros do **Quadro 4.5** foram ajustados até os valores simulados se aproximarem dos medidos. O campo “Fitted_Value” informa os melhores resultados da função objetivo (n° 18, 1985 e n° 50, 2019, ambos da iteração 3), permitem uma hierarquização e auxílio na compreensão dos processos relevantes da bacia, a partir dos valores de *T-Stat* e *P-Value*. Vale a pena ressaltar que o valor da função objetivo utilizada é de 0.5.

4.3.5 O comportamento hidrológico no modelo

O comportamento do modelo foi analisado a partir do ciclo hidrológico gerado no SWAT, com estimativas médias dos parâmetros e das variáveis no período simulado, o leitor pode consultar a literatura para realizar a comparação do balanço hídrico para o Cerrado.

Considerando os resultados no período de 1985, no qual 19,54% do volume total de chuva foi convertido em evapotranspiração, 7,16% em SURq; 24,53% em LATq; 54,25% de água disponível para PERC; 1,85% em REVAP; 2,71% para DEEP e valor da CN médio de 2,90. Quanto aos valores aproximados dos resultados alcançados no período de 2019, o modelo subestimou cerca de vinte vezes o LATq e superestimou a evapotranspiração quase o dobro.

De acordo com os resultados na literatura do balanço hídrico, observou-se que o modelo superestimou a precipitação cerca de 280mm a mais por período, variaram de 304,50 a 684,50mm, idêntico a informação de excessos de água fornecida no SWATCheck.

Ao observar os valores apresentados na literatura (**Tabela 4.11**), observa-se que o modelo subestimou a evapotranspiração e um elevado valor de SURq e de escoamento total, em que segundo na literatura, esse valor não deveria ultrapassar 3% do total precipitado. Entretanto, o valor de CN_2 gerado pelo modelo se mostrou baixo para a área de estudo, visto que a bacia ainda não apresenta alto grau de urbanização.

Tabela 4.11 Valores obtidos do ciclo hidrológico no modelo calibrado

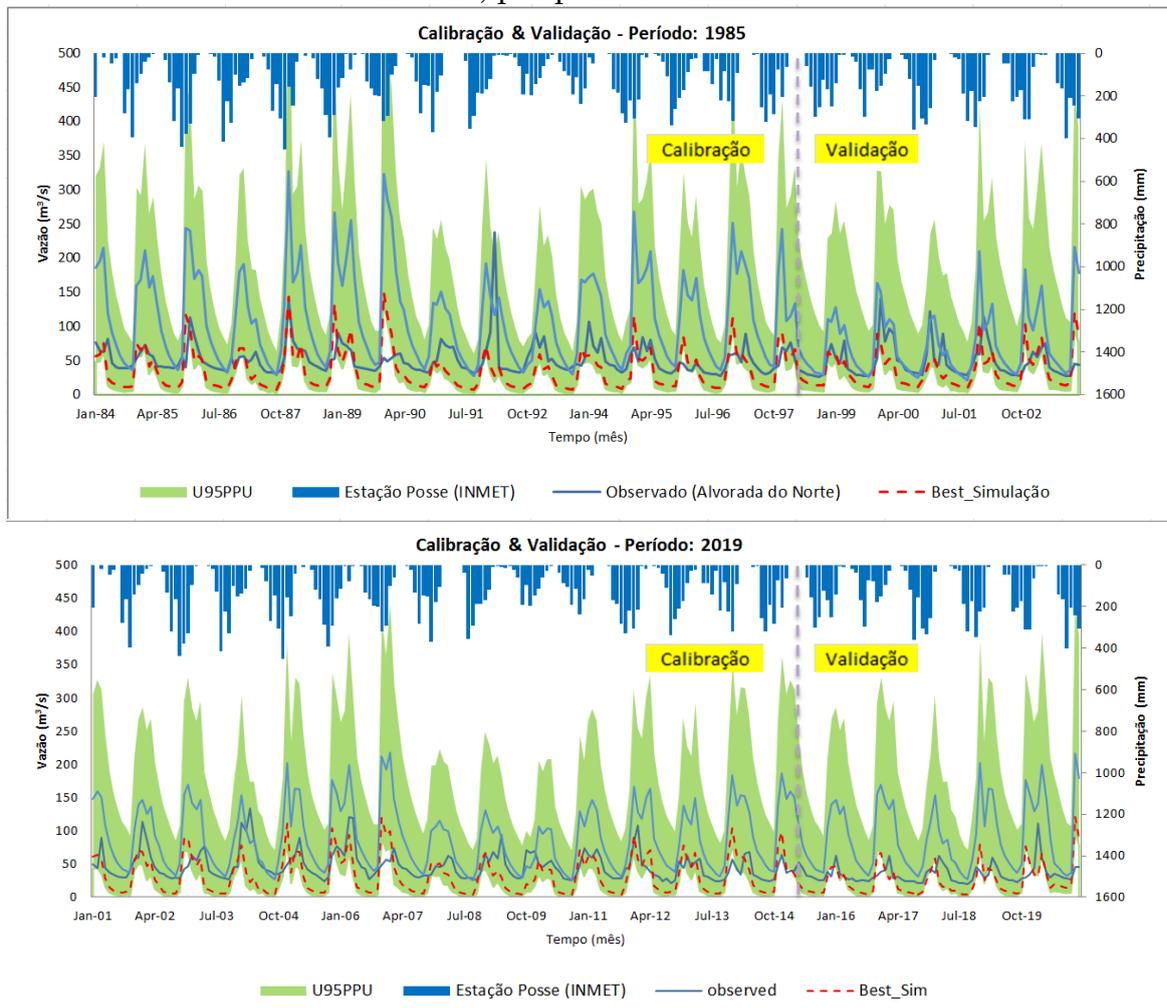
COMPONENTE HIDROLÓGICO	1985		2019	
	mm	%	mm	%
Precipitação	1.854,50	100,00	1.954,50	100,00
Evapotranspiração potencial - PET	1.721,10	92,81	1.721,10	88,06
Evapotranspiração - ET	362,40	19,54	731,80	37,44

COMPONENTE HIDROLÓGICO	1985		2019	
	mm	%	mm	%
Fluxo lateral - LATq	454,87	24,53	31,67	1,62
Runoff superficial - SURq	132,70	7,16	128,84	6,59
Percolação do aquífero raso - PERC	1.006,00	54,25	1.067,85	54,64
Fluxo de retorno - RETURN	923,28	49,79	998,72	51,10
Recarga para o aquífero profundo - DEEP	50,30	2,71	69,30	3,55
Ascensão capilar do aquífero raso - REVAP	34,35	1,85	37,43	1,92
Curva número - CN ₂	53,87	2,90	47,82	2,45

Fonte: Os autores (2022)

Sobre o comportamento dos dados médios mensais entre o período 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2020 obtidos das estações meteorológicas e hidrológicas são apresentados na **Figura 4.21** e **Quadro 4.6**, pode-se observar, além da discrepância, maior variabilidade para os valores simulados em relação aos observados. O Best_Sim diz respeito a melhor simulação no modelo obtido pelo SWATCUP, assim como as estatísticas do U95PPU próximos ao observado (ABBASPOUR, 2015).

Figura 4.21 Comparação do fluxo mensal durante a calibração e verificação do modelo, por período simulado



Fonte: Os autores (2022)

Quadro 4.6 Resumo das informações sobre os eventos básicos simulado pelo modelo

EVENTOS	m ³ s ⁻¹	
	1985	2019
Picos de vazão média mensal foram superestimados pelo modelo quase duas vezes	Máx. de 470 m ³ s ⁻¹	Máx. de até 366 m ³ s ⁻¹ ,
Picos máximos observados não ultrapassam	237 m ³ s ⁻¹ .	133 m ³ s ⁻¹ .
Escoamento de base valor menor	0,38 m ³ s ⁻¹	0,94 m ³ s ⁻¹
Vazão mínima observada	26 m ³ s ⁻¹	19,36 m ³ s ⁻¹

Fonte: Os autores (2022)

Na **Figura 4.21** é apresentado a comparação das vazões mensais pós-calibração simuladas e observadas, que apresentam melhor a modelagem, pois pode-se observar a tendência do modelo superestimar as vazões nas estações chuvosas e subestimar nas estações secas, porém, é possível perceber que o SWATCUP teve dificuldade em ajustar o modelo quanto aos picos de vazão e do fluxo de base. Em contraste, a comparação visual com hidrogramas medidos e estimados, se saiu melhor que as estatísticas do modelo.

Os valores simulados pelo modelo foram comparados com os dados hidrológicos medidos. Os resultados do escoamento superficial e total mensal foram considerados insatisfatórios (NSE e R² < 0,5). No entanto, devido às longas séries, foi constatado que o modelo simula melhor em estações situadas dentro da própria bacia, sete das vinte estações e com períodos mais curtos que o estudado.

No entanto, a principal limitação do SWAT para representar as variáveis em escala mensal está relacionada aos eventos pluviométricos que ocorrem em pequenas bacias hidrográficas. O modelo superestimou as simulações mensais de vazão, mas os valores de NSE mostram uma baixa relação entre os valores simulados e observados. Em uma escala mensal, os erros, tanto superestimados quanto subestimados, são compensados, resultando em um melhor ajuste com os valores observados que os diários. Outro aspecto observado é a tendência do modelo de subestimar o total de vazão nos anos mais úmidos e superestimá-la nos anos mais secos.

No geral, tanto para escoamento quanto para vazão total, estudos relataram que SWAT apresenta baixos valores de NSE para as simulações, independentemente da calibração. Fatores como representação inadequada da variabilidade espacial dos dados de chuva, bem como erros e/ou descontinuidades na medição de vazão e uma longa observação/simulação por período foram citados para justificar essa condição.

4.3.6 Matriz de transferência da mudança LULC na bacia

Alusivo a matriz de transferência, as áreas de formação savânica, campestre, pasto, reservatórios e áreas urbanas aumentaram, enquanto que as áreas de agricultura e de floresta diminuíram. Assim, foi alta as taxas de

transferências de LULC, com ganhos nas taxas de terras para pasto e perdas consideráveis entre terras de agricultura e de floresta (**Tabela 4.12**).

Tabela 4.12 Proporção (%) das estatísticas reclassificadas de LULC por período

LULC	1985	2019	Taxa de mudança
Área Urbana	0,04	0,18	0,14
Floresta	9,72	2,96	-6,76
Formação Savânica	37,24	38,07	0,83
Formação Campestre	26,25	27,15	0,91
Pasto	11,74	23,38	11,64
Terras agrícolas	14,98	7,98	-7,00
Reservatórios	0,04	0,28	0,14
TOTAL	100	100	

Fonte: Os autores (2022)

A proporção de terras do grupo de florestas diminuiu de 73,21% em 1985 para 68,18% em 2019, uma diferença de -5,03%, uma perda de -193,27 km². A proporção de terras de pasto aumentou de 11,74% em 1985 para 23,38% em 2019, uma ampliação de 11,64% e incremento de 401,79 km².

Concomitantemente, a proporção da transformação entre agricultura, pasto e terra de floresta está praticamente equilibrada ao longo dos últimos 34 anos. Mudanças significativas ocorreram no LULC por causa do empenho governamental, após a instituição a partir de 2001 da ANRV e parte da APA Simolândia na bacia (SIMOLÂNDIA, 2017), entre outras, com medidas conservacionistas, obtendo-se um bom efeito.

Quando avaliada a correlação (R) entre os dados da geração do escoamento e de LULC, confirma-se terras de floresta nativa (FRSE) sendo reduzidas ao longo do período analisado, apresentou correlação negativa com URMD, ET e GW_q, tendo a correlação moderada com as marcas que indicam floresta savânica (FRSD). A matriz de correlação da **Tabela 4.13** foi obtida a partir das variáveis com diferentes funções.

Tabela 4.13 A CCP das variáveis de LULC e geração de escoamento ao longo dos anos de 1985 e 2019

	FRSE	FRSD	RNGE	PAST	URMD	WATR	ET	SUR _q	GW _q	SYLD
FRSE	Dark Blue									
FRSD	Light Blue	Dark Blue								
RNGE	Light Blue	Light Blue	Dark Blue							
PAST	Light Blue	Light Blue	Orange	Dark Blue						
URMD	Yellow	Yellow	Yellow	Light Blue	Dark Blue					
WATR	Light Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Light Blue	Yellow				
ET	Yellow	Light Blue								
SUR _q	Light Blue	Yellow	Orange	Light Blue	Yellow	Yellow	Light Blue	Light Blue		
GW _q	Yellow	Light Blue	Light Blue	Orange	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Orange	Dark Blue	
SYLD	Light Blue	Yellow	Orange	Light Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Light Blue	Orange	Light Blue

Legenda			
Intensidade da correlação	Valor	Positiva	Negativa
Perfeita	0,9 a 1		
Forte	0,7 a 0,9		
Moderada	0,5 a 0,7		
Fraca	0,3 a 0,5		
Ínfima	0 a 0,3		

Fonte: Os autores (2022)

Essa correlação é em parte justificada pelo aumento do URMD em áreas que são ocupadas por vegetação nativa, como demonstra **Tabela 4.12**, também por ocorrer uma diminuição progressiva dessa vegetação e aumento do SYLD, PAST e RNGE.

No geral, o aumento da área desmatada leva ao acréscimo do SURq e diminui o GWq, no qual se reflete e quantifica nos parâmetros otimizados no modelo. As mudanças relativas no SURq, variam de 9,80% e 5,77% em relação ao volume precipitado, respectivamente.

Deste modo, o SURq aumenta no início, mas diminui subsequentemente (NEITSCH et al., 2011), pois em solo recoberto com este tipo de vegetação, o torna mais protegido da ação erosiva da água e do vento. Já as áreas antropizadas tem relação inversamente proporcional, sendo que o SURq é maior e o GWq, menor.

Os valores médios anuais em rendimento de sedimentos (SYLD) em t/ha 17,78 em 1985, foi maior que o mapa de LULC de 2019 com 5,60 t/ha, um decréscimo total de -12,18 t/ha (equivalente à -52,10%, tendo correlação positiva significativa com SURq.

Logo, as mudanças no LULC que mostraram correlação positiva expressivamente forte foram os grupos de florestas com alto nível de significância com terras de pasto.

4.3.7 Padrão do escoamento no relevo na bacia

Quanto ao efeito no gradiente com base nos fatores topográficos, a bacia se apresenta mais inclinada a Leste (bordeando a bacia) e mais rebaixada a Noroeste, área de descarga, idêntico a espacialização por subbacias, do comportamento do *slope* e das elevações geradas pelo modelo, demonstrando que a inclinação é inversamente proporcional aos valores da elevação, sendo menor no escoadouro onde a inclinação é maior.

Os valores médios por subbacia dos gradientes de elevação que variam de 556 a 908 m e de inclinação, entre 5° a 31° (**Tabela 4.14** e **Tabela 4.15**). As variações de escoamento com elevação pequena (4-81mm) tem flutuações insignificantes (7%) no gradiente, sendo relativamente menores para 2019, onde nas altitudes entre 645-741 m o SURq médio é de 59mm e o percentual do gradiente com variação de 32%, em contraste, apresenta o maior valor de SURq na bacia na ordem de 545mm.

Tabela 4.14 Dados do GWq nos diferentes gradientes do relevo cárstico

Elemento	Gradiente	Área	Percentual do Gradiente	GWq (mm)			
				1985 (mm)	Média	2019 (mm)	Média
Elevação (m)	556,07 - 645,95	47,76 - 5.822,03	7,85%	0,00 - 25,99	13,00	6,15 - 446,09	226,12
	645,95 - 741,22	5.822,03 - 14.544,70	32,70%	25,99 - 58,77	42,38	446,09 - 1.015,35	730,72
	741,22 - 908,40	14.544,70 - 29.992,34	59,45%	58,77 - 82,91	70,84	1.015,35 - 1.441,85	1228,60
Inclinação (°)	5,26 - 6,21	47,76 - 4.637,19	20,12%	0,00 - 9,23	4,62	6,16 - 211,59	108,88
	6,21 - 8,82	4.637,19 - 8.688,14	26,30%	9,23 - 29,55	19,39	211,60 - 446,09	328,85
	8,82 - 11,34	8.688,14 - 13.297,77	27,63%	29,55 - 58,77	44,16	446,09 - 788,16	617,13
	11,34 - 15,87	13.297,76 - 19.181,28	15,97%	58,77 - 73,16	65,97	788,16 - 1.015,35	901,76
	15,87 - 31,56	19.181,28 - 29.992,34	9,97%	73,16 - 82,91	78,04	1.015,35 - 1.441,86	1228,61

Fonte: Os autores (2022)

Tabela 4.15 Dados do SURq e ET em diferentes gradientes topográficos

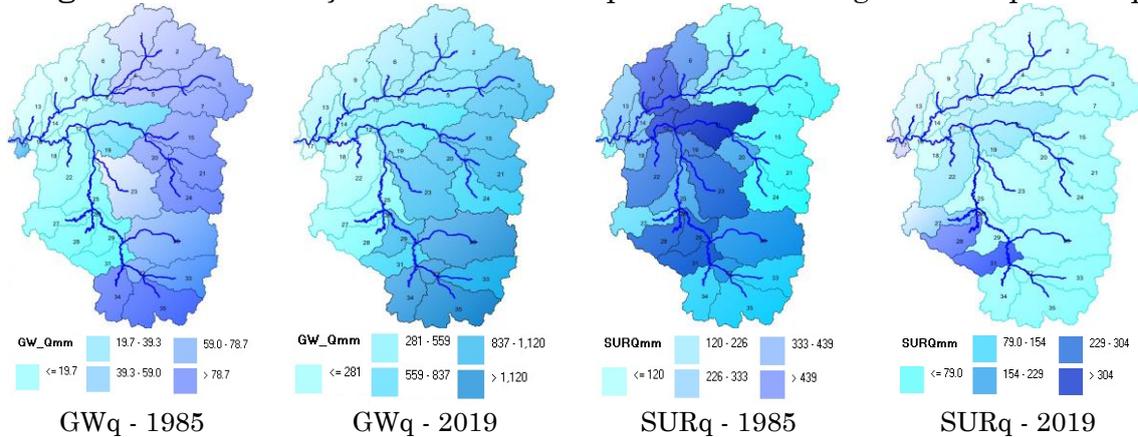
Elemento	Gradiente	SURq (mm)				ET (mm)			
		1985 (mm)	Média	2019 (mm)	Média	1985 (mm)	Média	2019 (mm)	Média
Elevação (m)	556,07 - 645,95	4,05 - 81,45	42,75	0,19 - 31,12	15,66	323,33 - 536,57	429,95	511,59 - 582,25	546,92
	645,95 - 741,22	81,45 - 231,59	156,52	31,12 - 87,21	59,17	536,57 - 706,27	621,42	582,24 - 641,50	611,87
	741,22 - 908,40	231,59 - 378,96	305,28	87,21 - 199,73	143,47	706,27 - 822,44	764,36	641,50 - 718,52	680,01
Inclinação (°)	5,26 - 6,21	4,05 - 81,45	42,75	13,39 - 36,79	25,09	323,33 - 443,13	383,23	511,59 - 534,64	523,12
	6,21 - 8,82	81,45 - 138,73	110,09	36,79 - 54,30	45,55	443,13 - 557,70	500,42	534,64 - 585,55	560,10
	8,82 - 11,34	138,73 - 202,16	170,45	54,30 - 135,26	94,78	557,70 - 661,98	609,84	585,55 - 613,31	599,43
	11,34 - 15,87	202,16 - 312,64	257,40	135,26 - 260,39	197,83	661,98 - 706,27	684,13	613,31 - 641,50	627,41
	15,87 - 31,56	312,64 - 378,96	345,80	260,39 - 545,55	402,97	706,27 - 822,44	764,36	641,50 - 718,52	680,01

Fonte: Os autores (2022)

Em diferentes faixas de inclinação, a PET média real oscila entre 511 e 718mm. O maior valor de SURq na bacia é de 545mm, em 2019.

Constatou-se mudanças nos componentes hidrológicos da bacia por períodos, a partir dos resultados da simulação. Sendo assim, o coeficiente do SURq em 1985 foi de 6,20% e de 3,56% em 2019, com variação dependendo do evento chuvoso. Este coeficiente é calculado, dividindo-se o escoado pelo precipitado (NEITSCH et al., 2011). Em 50% da bacia, o SURq está entre 0-170mm (1985) e entre 0-78mm (2019), principalmente na porção Leste. O volume médio total de SURq durante o período de estudo é maior à Oeste e mais baixo a Leste (Figura 4.22), e flutua com espessura de 79 a 439mm, com uma média de 259mm.

Figura 4.22 Mudança sensata nos componentes hidrológicos: GWq e SURq



Fonte: Os autores (2022)

Quando a taxa de água na superfície excede a taxa de infiltração, ocorre o SURq (NEITSCH et al., 2011), e o perfil de solo vai se tornando saturado e a infiltração vai diminuindo, favorece o SURq (HOU; GAO, 2019).

O SURq total é relativamente baixo na ABRC, porém, constatou-se que no

período de 1985, um valor médio de 168mm, foi maior que no de 2019, com 117mm, refletindo uma notável heterogeneidade espacial.

As estruturas hidrológicas binárias de superfície-subsuperfície únicas causam uma quantidade considerável de perda de água superficial para a subsuperfície. Aproximadamente 60 a 70% da região tem um volume de percolação do GWq de 49 a 63mm em 1985 e 663 a 787mm, em 2019. Portanto, o GWq é maior na região da ANRV e nas áreas com maior presença de vegetação na bacia, sendo contrariamente proporcional ao SURq.

Entretanto, a elevação tem efeitos significativos no SURq e GWq na bacia. A porcentagem de GWq aumenta com a elevação, enquanto a do SURq diminui. A análise de gradiente do declive indica que o escoamento aumenta em encostas mais íngremes. O SURq aumenta primeiro e depois diminui com o aumento da inclinação. Atinge um máximo (130mm) em declives de 5 a 10°. Para uma faixa de inclinação de 0 a 10°, o escoamento aumenta com a inclinação.

Deste modo, é possível afirmar que os dados demonstraram a existência de um padrão notável da geração de escoamento em praticamente todas as vertentes analisadas, conforme anteriormente mencionadas, em detrimento de reanálises, correlações e reclassificações de mapas de LULC, idêntico aos componentes hidrológicos sob diversos gradientes de elevação e inclinação, de maneira a legitimar as interações entre os fatores que influenciam tanto as produções de sedimentos como de escoamento.

4.3.8 Conclusão

Contribuições de mudanças de LULC em vários padrões da geração de escoamento na escala de bacia hidrográfica foi analisada, quantificada e combinada a modelagem hidrológica com técnicas de correlação espacial envolvendo o sensoriamento remoto. Esta porção da bacia do Rio Corrente foi selecionada como local de estudo que sofreu várias mudanças devido à abertura da fronteira agrícola no Centro-Oeste e posteriori, o incremento de restauração ecológica, que pode ter refletido no aumento excessivo do volume de água sugerindo um ajuste no modelo. Resumiu-se as conclusões pela seguinte forma:

- A ampliação do SURq foi estimada como um impacto negativo na bacia. Pode fortalecer ainda mais um estresse ambiental por meio da geração de mais sedimento e erosão que, comumente estavam abertamente conexos ao volume e velocidade do escoamento;
- Em geral, o aumento de áreas de pasto e de SURq pode agravar o problema ambiental, gerando mais erosão e sedimento que requerem estudos futuros apoiados em dados de campo. Além disso, o impacto dos cenários de mudanças de LULC/componentes hidrológicos e as incertezas do modelo podem ser mais investigadas, o que ajudaria os tomadores de decisões a enfrentar os desafios ambientais emergentes no futuro;
- O enfoque empregado nesse estudo, gerou subsídios das mudanças para os LULC nos componentes hidrológicos, munindo de dados quantitativos para auxiliar na tomada de decisão da gestão do meio ambiente e dos recursos hídricos.

Essa investida provê um modelo palpável de coerência de modelagem hidrológica, usando mapas de LULC digitais, produtos de sensoriamento remoto, com uma correlação útil de variáveis dependentes para entender o possível impacto que ocorreu na mudança do padrão espacial da geração de escoamento da bacia. Podendo ser largamente aplicado em outras áreas, onde o mapa de LULC digital multitemporal estiver disponível para prever os efeitos da mudança de LULC sob a hidrologia.

Compreender como uma modelagem hidrológica utiliza diferentes métodos e tecnologias, é algo de suma importância atualmente, pois as possibilidades de diferentes aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, permitem o desenvolvimento de projetos que favoreçam ao uso racional do solo, resultando em uma melhor qualidade de vida das pessoas.

De maneira geral, através da modelagem e do Coeficiente de Correlação de Pearson pode-se levantar hipóteses sobre a influência de LULC nas mudanças dos componentes hidrológicos identificados na área estudada ao longo do período de 42 anos. Tais constatações podem contribuir com o entendimento do padrão espacial da geração do escoamento, questão relevante para uma possível recuperação das subbacias da região.

CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é descrito as últimas considerações da pesquisa, referente à temática envolvida, sobre o objeto, os procedimentos realizados e os resultados do estudo, face ao trabalho realizado, devem ser notificadas algumas formulações básicas.

Sob o quadro da degradação que assolam trechos destes frágeis recursos, combinado com a atividade humana, foi necessário entender o comportamento do: *a)* o padrão espacial do escoamento na bacia e dos *b)* fatores de impacto na geração de escoamento superficial na feição cárstica. Assim como, *c)* das relações estatísticas espaciais entre os diferentes fatores ambientais/antrópicos que impactam na geração de escoamento na região.

Nesse sentido, foi selecionada estrategicamente uma bacia do Cerrado Brasileiro com ocorrência de rochas calcárias em parte da área da bacia.

Foi dentro desta perspectiva que esta tese buscou o aprofundamento de três pontos cruciais, a saber: 1) qual é o padrão espacial do escoamento superficial em uma região tipicamente cárstica na bacia alto Rio Corrente? 2) como correlacionar às mudanças no LULC, por períodos distintos (1985-2019) e com respostas hidrológicas na bacia durante as etapas de calibração e validação? e 3) quais as relações estatísticas espaciais ligadas aos diversos fatores antrópicos que impactam na geração de escoamento na região de rochas tipicamente calcárias na porção alta da bacia do Rio Corrente, localizado no Estado do Goiás? Para ampliar o conhecimento sobre essas questões, foram utilizados diversos dados espaciais, oriundos do: *i)* de sensoriamento remoto, tais como: o DEM para simulação, processamento e obtenção da declividade pelo SWAT e identificação do fator de inclinação do terreno, assim como dos produtos do MapBiomas (2022) de LULC e dos tipos de solos do Brasil fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para determinação das categorias de solos no modelo e de dados meteorológicos da chuva, da temperatura, do vento, da radiação solar, da umidade e dos fatores hidrológicos.

A metodologia da pesquisa consistiu na aplicação do modelo norte-americano, o SWAT que se baseia nos mecanismos físicos de uma bacia hidrográfica visando descrever alguns processos hidrológicos, empregando modelos empíricos. O modelo hidrológico do trecho superior da bacia do Rio Corrente foi calibrado e validado como a principal técnica para simular a geração de escoamento na bacia composta inclusive, por rochas calcárias. Além disso, a variabilidade espacial do escoamento superficial e subterrâneo foi analisada juntamente com os métodos de análise de gradiente local. O que motivou criar a hipótese da pesquisa que foi confirmada de forma qualitativa.

Desta forma, os resultados da análise de sobreposição espacial mostraram que quanto maior é o grau de antropização da bacia, maior é o valor do SURq e inversamente proporcional é o valor distribuído das águas subterrâneas (GWq) (SAMAL; GEDAM, 2021). Como resultado foi discutido não só a capacidade de retenção de água ser maior nas florestas, quanto na questão da característica geológica de infiltração rápida que acontece nesta região, a partir dos efeitos refletidos da combinação dos tipos de LULC e das características topográficas na região (HOU; GAO, 2019).

Além disso, tem a questão da aplicabilidade da ferramenta. Como a unidade geomorfológica principal da bacia concernente ao ambiente cárstico, é do Grupo Bambuí, que corresponde cerca de 50% da área total da bacia, o tipo de reservatório característico é do tipo não-linear, que em contraste com o SWAT original, utiliza de um reservatório linear (WANG; BRUBAKER, 2014).

Assim sendo, é bastante discutido na literatura a dificuldade do SWAT modelar em unidades geológicas mais antigas que da Era Cenozóica, pois o fluxo escoamento comumente por fraturas/fissuras pelas rochas até atingir o reservatório (SPRUILL; WORKMAN; TARABA, 2000). Todavia, se faz necessário realizar ajustes na ferramenta para obtenção de dados mais aprimorados. Malagò et al. (2016) extraiu do mapa geológico, as classes associadas ao relevo cárstico, inserindo-as no mapa de solos. Outros autores, agregaram estas unidades, às classes no mapa de uso e cobertura da terra (MALAGÒ et al., 2016).

Todavia, nos mapas de solos e de LULC da pesquisa, não foi integrado tais feições, como pode ser observado nos mapas apresentados, sugestivo a *posteriori*, realizar essa adaptação. Sem esses ajustes, implica no fraco desempenho do modelo em simular tal feição. Vale ressaltar que a pesquisa foi prejudicada ainda, devido ao período pandêmico da COVID-19, pois o modelo necessita de dados de campo remissivo aos reservatórios da bacia, das fontes de contaminação, fraturas e/ou fissuras do terreno, eventos como sumidouros/dolinas,

dados de colheita, adubação entre outros, favorecendo na melhora das análises estatísticas do modelo.

Todavia, foram inseridos apenas os dados corriqueiros, tais como: DEM, LULC, solo e precipitação no *input* do SWAT, observando os devidos ajustes, tratamento, correções e adequações para entrada no modelo. Mesmo contendo uma maior porção de rochas calcárias na bacia, sem efetuar o devido ajuste no modelo, o SWAT simulou adequadamente o modelo do fluxo da bacia, conforme os hidrogramas por período, podendo ser previstos no SWAT para descrever os processos e realizar a parametrização dos sedimentos armazenados nas regiões das cavernas, daquelas induzidas pela supressão vegetal pela agropecuária.

Diante disso, conforme dados de sensoriamento remoto do LULC de 1985 e 2019, não houve mudanças significativas no LULC no trecho superior da bacia do Rio Corrente. Mudanças nas terras de florestas e de pastagens estão entre -6,73% a 11,74% respectivamente. Todavia, a atividade econômica predominante é a pecuária, tendo também a agricultura uma grande representatividade (MIRANDA, 2016).

De modo geral, a região da APA é bem conservada, pois a vegetação se recuperou após o decreto de criação da Área de Proteção Ambiental (APA) das Nascentes do Rio Vermelho (ANRV), tendo os usos bem mais definidos nesta categoria de Unidades de Conservação (UC) (MIRANDA, 2016).

5.1 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se incluir os dados medidos de sedimentos, para a calibração do modelo por subbacia. Estimular a atualização dos levantamentos dos dados de solo, LULC, topográficos contendo fraturas nas feições cársticas, inclusive a implantação de novas estações meteorológicas e hidrológicas com dados aprimorados de radiação, vento, vazão e sedimento. Utilizar mais séries de LULC e climáticas de curta duração, para efeito de comparação, por dar um bom efeito.

Para melhorar os resultados das simulações, realizou a calibração automática do modelo somente com os oito parâmetros mais sensíveis (quatro de vazão e quatro de sedimentos). Confrontar os resultados executando outros tipos de algoritmos de otimização além do SUFI2, *e.g.* Parasol e Glue. Tendendo a obtenção de melhor refinamento dos resultados, calibrar manualmente.

Aconselhar e incitar no ambiente acadêmico a disponibilidade de uma estrutura computacional (*hardware*) adequada para processamento de grande volume de dados, principalmente o processamento de séries diárias que exigem muita memória. Sugerir e incentivar o treinamento adequado para se trabalhar com a modelagem SWAT, uma vez que ela é exigente, complexa e tem muitos detalhes.

O modelo foi criado em escala macro para a bacia e carece de dados detalhados relacionados ao cenário específico do projeto de gestão da água, como operação de reservatório, mudança no padrão de cultivo, crescimento da vegetação, desvio de água da bacia para irrigação e geração de energia hidrelétrica que têm efeitos combinados no padrão de escoamento de fluxos na bacia. Com dados específicos do local e de gestão hídrica agrícola, os resultados do modelo poderiam ser melhorados ainda mais.

5.2 CONCLUSÃO

Desenvolveu-se uma pesquisa para quantificar e mapear as variações temporais da geração de escoamento na porção alta da Bacia do Rio Corrente em ambientes de mudança, integrando a produtividade da vegetação com base em sensoriamento remoto, em dados de monitoramento de corpos d'água e terrestres, de solo, clima, topografia e, componentes hidrológicos.

A série temporal do volume de SURq total médio simulado é maior no Leste e mais baixo no Nordeste da bacia. O SURq demonstra notável heterogeneidade espacial e o valor total é relativamente baixo comparado com o GWq de 2019.

Abreviando, nas regiões de cabeceira da bacia, a elevação é o fator dominante que afeta o volume do GWq, enquanto que, as condições de cobertura da terra determinam o volume de SURq. Nas regiões mais baixas e a jusante da bacia, tanto a topografia quanto a elevação afetam o GWq (NEITSCH et al., 2011; HOU; GAO, 2019).

Calibração e verificação do modelo SWAT (durante o período de simulação do modelo) resultou em um NSE negativo e um R² médio para os dois períodos, condizente com a literatura, conforme é explicitado no Capítulo 2. Entretanto, por inspeção visual, observou-se que o modelo apresentou melhor ajuste às baixas condições (WANG; BRUBAKER, 2014; HOU; GAO, 2019) e que foi capaz de simular de forma satisfatória a vazão da bacia, mensalmente em comparação com os eventos envolvidos nesse tipo de modelagem.

A aplicabilidade do modelo SWAT à bacia foi melhorada por meio de análises de sensibilidade e da calibração dos parâmetros utilizados. O SURq demonstra notável heterogeneidade espacial e o valor total é relativamente baixo se comparado com o GWq de 2019.

O *SWATCheck* alertou que o SED máximo do SWAT é superior a 50 ton/ha em pelo menos uma HRU. O valor mais alto é na HRU 174, identificado na subbacia 25 com LULC de área de pasto e argissolo. A mudança de sedimento no fluxo do canal foi de -14 mg/ha.

No período simulado de 1985, a subbacia 28 tem o maior valor de SURq médio anual simulado, isso se deve ao fato de que cerca de 30% da sua área total é composta por terras utilizadas para cultivo agrícola e pecuária. A subbacia 27 também segue esse padrão, juntamente com a subbacia 17 (onde se observa a atividade pecuarista) por serem subbacias bastante modificadas pelo homem. O SURq de 1985, diminuiu de 168,79mm para 118,46mm em 2019, atenuando cerca de 50,33mm; e, a percolação do GWq médio anual de água aumentou expressivamente de 38,08mm em 1985 para 697,75mm em 2019, um aumento de 659,66mm.

Já a parte Oeste da bacia, composta por regiões de produção agrícola (canavieira), pecuária, solo exposto e por conter área urbana de média e baixa densidade, possui maior valor de SURq, variando de 200 a 370mm em 1985 e de 120 a 500mm em 2019. Referente ao período de 2019, a subbacia 10 afere o maior valor de SURq seguido da subbacia 12. Isso se deve ao fato de que 50,31% e 56,93% de cada área total simultaneamente, abrangem terras de pecuária. As subbacias 19 e 23, também seguem esse padrão, de serem subbacias bastante antropizadas.

Assim, os principais fatores do aumento do SURq, da percolação GWq nas subbacias estão conectados com o aumento de terras de pasto e à diminuição da área de terras agrícolas e de florestas.

Ao estudar a geração de escoamento em uma bacia com feição cárstica e suas características de variação espacial, conclui-se que medidas de restauração ecológica especificamente projetadas (ANRV nas regiões a montante e intercalar o plantio florestal com áreas de pasto em regiões calcárias a jusante) podem aumentar a retenção de água na região, reduzir o volume de SURq e diminuir o processo de desertificação rochosa provocado pelo pastoreio em área de cavernas, fortalecendo a capacidade regional de conservação do solo.

Isso verifica a usabilidade do modelo como um indicador eficiente para caracterizar as mudanças viciadas do sistema hídrico sob os impactos das mudanças climáticas, restauração da vegetação e mudanças no LULC em escala regional. A abordagem do SWAT pode ser ainda verificada e utilizada em outras regiões da terra firme como uma ferramenta de apoio à decisão para o manejo sustentável da restauração do ecossistema e dos recursos hídricos.

As implicações políticas específicas com base na pesquisa são diversas e vamos relatá-las a seguir:

A conservação do solo é relativamente alta. O armazenamento de carbono é obtido devolvendo-se as terras agrícolas às florestas/pecuária, contribuindo para uma utilização sustentável. Por meio da análise de compensação espacial, sugere-se que a proteção e restauração da floresta em áreas de pasto devem ser consideradas, assim como o tamanho da população e a expansão da área edificada, devem ser questionados e adequadamente controlados, inclusive a possível extensão da área de abrangência da ANRV, sob regiões cársticas na bacia, entre outros.

O aumento do SURq é considerado um impacto negativo na bacia hidrográfica que reequilibra outros processos hidrológicos, podendo agravar o problema ambiental, gerando mais erosão, sedimentos, aumento de fraturas e inundação nas áreas de cavernas, fatos que necessitam de outros estudos futuros com base em dados coletados em campo. Além disso, as incertezas no modelo podem ser investigadas, visando auxiliar na tomada de decisão dos possíveis desafios ambientais futuros.

Na estação chuvosa há um aumento do SURq e grande parte do líquido infiltra pelas fraturas das rochas calcárias, provocando aumento no volume do GWq e turbidez. Entre outros, é bastante discutida a integração lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta (LPF) na melhoria da fertilidade e do aumento da retenção d'água no solo (BRASIL, 2022).

E, por fim, a região da ABRC carece de um gerenciamento intensivo em algumas áreas localizadas no relevo cárstico, ligadas ao grupo Bambuí. No geral, este estudo promoverá o desenvolvimento de políticas públicas, de planejamento e gestão em saúde, inovação nas atividades ligadas ao patrimônio cultural e ambiental, e de pesquisas e desenvolvimento científico na região cárstica, além de fornecer uma base teórica para a reconstrução e restauração ecológica. Outrossim, foi verificada a necessidade de uma política

intensiva de BPM em áreas vulneráveis de cavernas, para evitar processos de sedimentação nas cavernas derivado do solo desnudo pelas pastagens.

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. **SWATCUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs: a User Manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), **Eawag**, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2015. 100p. Disponível em: https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf Acesso em: 15 jan. 2022.

AFINOWICZ, J. D.; MUNSTER, C. L.; WILCOX, B. P. Modeling effects of brush management on the rangeland water budget: Edwards Plateau, Texas. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**. v. 41, n. 04040, p. 181-193, 2005. Disponível em: <http://agrilifecdn.tamu.edu/wilcox/files/2013/01/Afin.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2022.

ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. 1. ed. Goiânia: Governo do Estado de Goiás, 2006. 232 p. (Série Geologia e Mineração). Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/2418/1/Geol_Rec_Min_Go-DF.pdf. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24027.pdf> Acesso em: 11 jun. 2021.

ALOS PALSAR. **Global Radar Imagery: 2006-2011**. Fairbanks: Alaska Satellite Facility. 2022. Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/> Acesso: 22 mar. 2022.

AMATYA, D. M.; JHA, M.; EDWARDS, A. E. SWAT-based streamflow and embayment modeling of cársticos-affected chapel branch watershed, South Carolina. **Transactions of the Asabe**, v. 54. n. 4. p. 1311-1323, jul/aug. 2011. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=39033&CID=t2011&v=54&i=4&T=1> Acesso em: 22 jun. 2022.

AMIN, M. G. M.; KARSTEN, H. D.; VEITH, T. L.; BEEGLE, D. B.; KLEINMAN; P. J. Conservation dairy farming impact on water quality in a karst watershed in northeastern US. **Agricultural Systems**. v. 165, p. 187-196, 2018. DOI: org/10.1016/j.agsy.2018.06.010 Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X17309782?via%3Dihub>

Acesso em: 11 jun. 2021.

AMIN, M. G. M.; VEITH, T. L.; COLLICK, A. S.; KARSTEN, H. D. ; BUDA, A. R. Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst watershed: a variable source area hydrology model evaluation. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 212-223, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416302578> Acesso em: 11 jun. 2021.

ARAÚJO, L. P. et al. Estudo sistematizado das consequências da urbanização acelerada em torno da lagoa dos potiguares, Natal/RN. **Estudos Geográficos: Revista eletrônica de geografia**, Rio Claro, v. 2, n. 2, 2004. Disponível em:

<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/272> Acesso em: 15 jul. 2004.

ARAÚJO, L. P.; FIGUEIREDO, V. S. (org). **Estado da arte das feições em carste no mundo: aplicação do SWAT e emprego das metodologias**. In: MARTINS, F. P; PEDROSO, L. B. Espaço Geográfico: diversidade temática e metodológica, Ituiutaba: Zion, Cap.5 p. 69-84. 2021. Disponível em:

<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/599505> Acesso em: 11 jun. 2021.

ARAÚJO, L. P.; FIGUEIREDO, V. S.; SOUTO, M. V. S. Estado da arte: aplicação do modelo SWAT no relevo cárstico. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia-MG v. 23, n. 8. 150-172. 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/RCG238960294> Acesso em: 11 out. 2022.

BAFFAUT, C.; BENSON, V. W. Modeling flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 02, p. 469-479, 2009. DOI: 10.13031/2013.26840. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/download/30434/PDF> Acesso em: 11 jun. 2022.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. São Paulo: USP: **Instituto de Geografia**, 1972.

BRASIL. **Lei nº 11.516 de 28 de agosto de 2007**. Dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes; altera as Leis nºs 7.735, de 22 fev. 1989, 11.284, de 2 mar. 2006, 9.985, de 18 jul. 2000, 10.410, de 11 jan. 2002, 11.156, de 29 jul. 2005, 11.357, de 19 out. 2006, e 7.957, de 20 dez. 1989; revoga dispositivos da Lei nº 8.028, de 12 abr. 1990, e da Medida Provisória nº 2.216-37, de 31 ago. 2001; e dá outras providências. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111516.htm Acesso em: 13 jun. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 7 abr. 2022.

BRASIL. Ministério da Economia. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. **Catálogo de Dados Espaciais**. Brasília: INDE, 2022. Disponível em: <https://visualizador.inde.gov.br/> Acesso em: 25 jan. 2022

BRASIL. Ministério da Educação. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. **Portal de Periódicos Capes**. Brasília: CAPES, 2019. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/lista-a-z-periodicos.htm> Acesso em: 11 jun. 2021.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto Radambrasil. **Folha SD. 22 Goiás**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1981. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24027.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **HIDROWEB: SNIRH**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 21 jul. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Orientações para consistência de dados pluviométricos**. Brasília: ANA, 2012. 21 p. Disponível em:

<https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaConsistenciaDadosPluviometricos-VersaoJul12.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento do uso e cobertura da terra do cerrado**: Projeto TerraClass Cerrado 2013. Brasília: MMA, 2015. 60 p. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/Metodologia_TCCerrado_2013.pdf Acesso em: 13 set. 2021.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal de Mapas do IBGE**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://geofp.ibge.gov.br/> Acesso em: 6 jan. 2022.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. **Dissertação (Mestrado em Geociências)** - Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental), Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2013. 141p. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13863/1/2013_KassiaBatistaCastro.pdf. Acesso em: 22 ago. 2021.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p. Disponível em: <https://silo.tips/download/modelagem-de-sistemas-ambientais> Acesso em: 11 mar. 2019.

DANTAS, J. C. **Processo hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Taperoá**. 2016. 84 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geografia, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13553.63848> Acesso em: 11 jun. 2021.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática**: estudo de caso da Bacia do lago descoberto - DF. 2014. 147 f. **Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)** - Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/03/Sara_Ferrigo.pdf Acesso em: 19 jan. 2021.

GOMES, Paulo César da Costa. Geografia e modernidade. Rio de Janeiro: **Bertrand Brasil**, 1996.

HOU, W; GAO, J. Simulating runoff generation and its spatial correlation with environmental factors in Sancha River Basin: the southern source of the Wujiang River.

Journal of Geographical Sciences, v. 29, p. 432-448, 2019. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11442-019-1608-z> Acesso em: 11 jun. 2022.

JAIN, S. ALE, S.; MUNSTER, C. L.; ANSLEY R. J.; KINIRY, J. R. Simulating the Hydrologic Impact of Arundo donax Invasion on the Headwaters of the Nueces River in Texas. **Hydrology**, v. 02, n. 03, p. 134-147, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/hydrology2030134> Acesso em: 11 jun. 2021.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. S.; STRAUCH, M.; LORZ, C. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em Bacia do bioma cerrado. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves.

Anais [..]. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1. Disponível em:

https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013_PAP013442.pdf Acesso em: 11 jun. 2021.

MALAGÒ, A. EFSTATHIOU, D.; BOURAOU, F.; NIKOLAIDIS, N. P.; FRANCHINIC, M.; BIDOGLIO, G.; KRITSOTAKIS, M. Regional scale hydrologic modeling of a Carstedominant geomorphology: the case study of the Island of Crete. **Journal of Hydrology**, v. 540, p. 64-81, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061> Acesso em: 11 jun. 2021.

MAPBIOMAS. **Coleção 3, 5 e 6 (1985-2020)**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em:

<https://mapbiomas.org/produtos> Acesso em: 12 out. 2022.

MARTINEZ, J. H. I. A.; GOMES SOBRINHO, T. R. Parâmetros para caracterização da água cárstica no brasil e em minas gerais: estado da arte e perspectivas futuras. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 19, n. 68, p. 61-80, dez. 2018. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.14393/RCG196805> Acesso em: 12 out. 2021.

MELO, O. A. G. **Modelagens hidrológicas aplicadas à análise do escoamento superficial da Bacia do Rio Ivaí-PR**. 2017. 119 f. Tese (Doutorado em Geografia) -

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Geografia, Maringá, 2017. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/5670> Acesso em: 11 jun. 2022.

MIRANDA, S. A. M. **Uso e ocupação do solo na APA das nascentes do Rio Vermelho: Conflito Socioambiental em Mambaí/GO**. 149 f. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) - Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Brasília, 2016. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/19256/1/2016_SuzaneAparecidaMoraisMiranda.pdf Acesso em: 12 out. 2019.

MORIASI D.N; ARNOLD J. G; VAN LIEW M. W; BINGER R. L; HARMEL R. D; VEITH T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans ASABE** 2007; 50(3): 885-900. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf> Acesso em: 12 jan. 2022.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 01, p. 282-290, 1970. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6) Acesso em: 11 jun. 2021.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool**: theoretical documentation: version, 2009. Texas (USA): Texas &M University: Texas Agricultural Experiment Station, 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> Acesso em: 11 jun. 2021.

NIE, W.; YUAN, Y.; KEPNER, W.; NASH, M. S.; JACKSON, M.; ERICKSON, C. Assessing Impacts of Landuse Changes on Hydrology for the Upper San Pedro Watershed. **Journal of Hydrology**. v. 01, n. 04, p. 105-114, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.012> Acesso em: 11 jun. 2021.

NIKOLAIDIS, N. P.; BOURAOUI, F.; BIDOGLIO, G. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam. v. 477, p. 129-138, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.018> Acesso em: 11 jun. 2021.

PALANISAMY, B.; WORKMAN, S. R. Hydrologic Modeling of Flow through Sinkholes Located in Streambeds of Cane Run Stream, Kentucky. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 20, n. 05, 2015. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001060> Acesso em: 11 jun. 2021.

PALAZÓN, L.; NAVAS, A. Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin). **Journal of Soils and Sediments**, Dordrecht, v. 14, p. 1612-1625, 2014. DOI: 10.1007/s11368-014-0911-7.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.025> Acesso em: 11 jun. 2021.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos/SP: EESC/USP, 1998. 819p.

SALERNO, F.; TARTARI, G. A coupled approach of surface hydrological modelling and Wavelet Analysis for understanding the baseflow components of river discharge in karst environments. **Journal of Hydrology**. v. 376, n. 1/2, p. 295-306, 2009. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.042> Acesso em: 11 jun. 2021.

SAMAL, D. R.; GEDAM, S. Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima River basin, India. **Environmental Challenges**, v. 05, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100251>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SANTOS, C. **Estatística Descritiva: Manual de Auto-Aprendizagem**. Lisboa: Edições Sílabo, 2007. Disponível em: <https://static.fnac-static.com/multimedia/PT/pdf/9789726189688.pdf> Acesso em: 12 set. 2021.

SANTOS, C. L. **Classificação de áreas de risco geomorfológico no município de João Pessoa-PB associadas a processos cársticos**. 2020. 154 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Geografia, Recife, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/39261?mode=full> <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20891> Acesso em: 21 jun. 2021.

SANTOS, R. F. **Análise da produção da carga líquida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT**. 2016. 126p. Dissertação (Mestrado em geografia) – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20891> Acesso em: 11 jun. 2022.

SILVA, J. M. da. **O serviço ambiental hidrológico das áreas de proteção permanente: um estudo de caso com modelagem numérica em pequena e mesoescala na Bacia do Rio Piracicaba**. 2014. 98f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São

Paulo, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2013. Disponível em:

<https://www.iag.usp.br/pos/meteorologia/portugues/dissertacoestestes/o-servi%C3%A7o-ambiental-hidrol%C3%B3gico-das-%C3%A1reas-de-prote%C3%A7%C3%A3o-perm>

Acesso em: 14 jan. 2021.

SIMÕES, K. **Modelagem hidrossedimentológica da Bacia do Rio Indaiá, Alto São Francisco, MG, utilizando SWAT**. 2019. 144f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em:

https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/38686/1/2019_KauemSim%C3%B5es.pdf.

Acesso em: 11 jun. 2022.

SIMOLÂNDIA. Prefeitura Municipal. **Decreto municipal n.º 947 de 26 setembro de 2017**. Dispõe sobre a criação da APA Simolândia e dá outras providências. 2017.

Disponível em: <https://portal.meioambiente.gov.br/unidadeconservacao/login.jsp>.

Acesso em: 24 set. 2021.

SISTEMA DE MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO. **Estações meteorológicas para o estado de Goiás**. AGRITEMPO, 2022. Disponível em:

<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estacao/index.jsp?siglaUF=GO> Acesso em: 29 jan. 2022.

SISTEMA ESTADUAL DE GEOINFORMAÇÃO DE GOIÁS. **Dados geográficos**. SIEG, 2018. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>. Acesso em: 12 out. 2018.

SOIL & WATER ASSESSMENT TOOL. **Global Weather Data**: 36-year period of 1979 through 2014. SWAT, 2022. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/data/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SOTCHAVA, V. B. O estudo de geossistemas. São Paulo: USP. **Instituto de Geografia**, 1977. (Métodos em Questão, 16).

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASABE**. v. 43, n. 06, p. 1431-1439, 2000. Disponível em:

<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=3041> Acesso em: 11 jun. 2021.

SULLIVAN, T. P.; GAO, Y. Development of a new P3 (probability, protection, and precipitation) method for vulnerability, hazard, and risk intensity index assessments in karst watersheds. **Journal of Hydrology**. v. 549, p. 428-451, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.007> Acesso em: 11 jun. 2021.

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi (Version 1.6) [Computer Software]**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.jamovi.org/>. Acesso em: 12 out. 2022.

TIAN, Y.; WANG, S.; BAI, X.; LUO, G.; XU, Y. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China. **Science of the Total Environment**, v. 566, p. 1297-1308, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.190> Acesso em: 11 jun. 2021.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN/IBGE, 1977.

VALE, M.; HOLMAN, I. P. Understanding the hydrological functioning of a shallow lake system within a coastal karstic aquifer in Wales, UK. **Journal of Hydrology**. v. 376, p. 285-294. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.041> Acesso em: 11 jun. 2021.

VIGIAK, O. MALAGÓ, A.; BOURAOUI, F.; VANMAERCCKE, M.; OBREJA, F.; POESEN, J.; HABERSACK, H.; FEHÉR, J.; GROŠEL, S. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. **Science of the Total Environment**. v. 599, p. 992-1012, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.236> Acesso em: 11 jun. 2021.

WANG, Y.; BRUBAKER, K. Implementing a nonlinear groundwater module in the soil and water assessment tool (SWAT). **Hydrological Processes**, v. 28, p. 3388-3403, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.9893> Acesso em: 11 jun. 2021.

WILLIAMS, T. M.; AMATYA, D. M. P. E.; HITCHCOCK, D. R. P. E.; EDWARDS, A. E. Streamflow and Nutrients from a Karst Watershed with a Downstream Embayment: Chapel Branch Creek. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, p. 428-438, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000794](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000794) Acesso em: 11 jun. 2021.