



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

IMPACTOS DO USO E COBERTURA DO SOLO NO REGIME HIDROLÓGICO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APEÚ/PA.

BELÉM - PARÁ

2019

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

IMPACTOS DO USO E COBERTURA DO SOLO NO REGIME HIDROLÓGICO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APEÚ/PA.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para obtenção título de Doutorado em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Sócio-Ambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Clima, Sociedade e Ambiente.

Orientador: Adriano Marlisom Leão de Sousa.

BELÉM - PARÁ

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com
ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

S237i Santos, Joyse Tatiane Souza dos
Impactos do uso e cobertura do solo no regime hidrológico
da bacia hidrográfica do rio Apeú/PA / Joyse Tatiane Souza dos
Santos. 2019.
120 f. : il. color.

Orientador (a): Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Pará, Belém, 2019.

1. Modelagem Hidrológica. 2. SWAT. 3.
Bacias Hidrográficas. 4. Vazão. I. Título.

CDD 551.48098115

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

IMPACTOS DO USO E COBERTURA DO SOLO NO REGIME HIDROLÓGICO DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO APEÚ/PA.

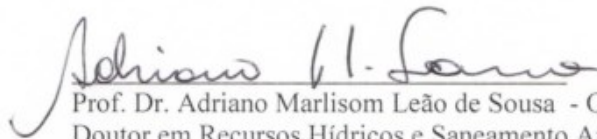
Tese aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Sócio-Ambiental na Amazônia.

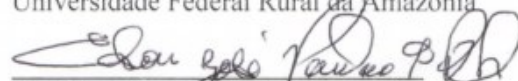
Linha de pesquisa: Clima, Sociedade e Ambiente.

Belém, 17 de Junho de 2019.

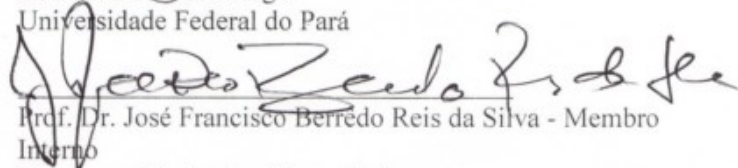
Banca Examinadora:



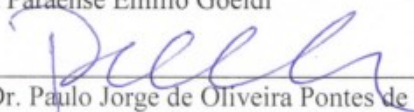
Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa - Orientador
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia



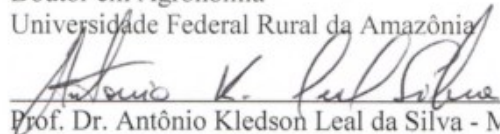
Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha – Membro Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. José Francisco Berrêdo Reis da Silva - Membro Interno
Doutor em Geologia e Geoquímica
Museu Paraense Emílio Goeldi



Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Pontes de Souza - Membro Externo
Doutor em Agronomia
Universidade Federal Rural da Amazônia



Prof. Dr. Antônio Kledson Leal da Silva - Membro Externo
Doutor em Ciência da Engenharia Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dedico aos meus Pais Maria Assunção e
Ivo Guedes (em memória) e meu afilhado Edgar Filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela força e conforto nos momentos em que pensei não suportar.

Agradeço a minha mãe Maria Assunção e meus irmãos Iran Carlos e Ivonete, minha tia/madrinha Ana Siqueira e primos, pelo incentivo e ombro amigo nas horas difíceis.

Agradeço ao meu amigo, noivo e companheiro Hildo Giuseppe que me ajudou a tornar esse trabalho real e sem sua força não seria possível.

Agradeço a todos os Professores que fizeram parte desta realização e que contribuíram decisivamente para meu entendimento e formação, especialmente a professora Isabel Vitorino e nossas conversas intermináveis e ao Professor Adriano Marlisom meu orientador, pela confiança depositada e ajuda nos estudos.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de estudo.

Agradeço ao professor Paulo Jorge Souza por todas as vezes que precisei de um apoio, conversa e direção na pesquisa e sempre esteve disposto a dar-me atenção e conselhos, mesmo estando muito ocupado.

Agradeço ao seu Raimundo, gerente da Fazenda Escola Castanhal (FEC) da Universidade Federal Rural da Amazônia, ao Deputado Hélio Leite por ceder sua fazenda para a realização das coletas, ao senhor Maradona e a dona Andréia, pela força, amizade, incentivo e auxílio em campo.

Agradeço a todos meus amigos que me ajudaram nessa caminhada, Ana Karla, Paulo Vinicius, Eiky Tatsuya, Ismael Soares, Juliana Rodrigues, Amanda Rosa, Adrea Lorena (em memória), Albertino Neto, Déborah Luciane, Vandeilson Belfort, Lucas Tavares, Paulo Henrique, Marina, Rhana, Jonhatas, Neto, Rommel e Telma Guimarães, pela compreensão e paciência, nos momentos de alegria e desespero, e a todos meus colegas de turma que fizeram parte desta luta.

Enfim, a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

Muito obrigada.

Ando devagar porque já tive pressa, e levo esse sorriso porque já chorei demais.
(Almir Sater e Renato Teixeira)

RESUMO

A preservação de uma bacia hidrográfica é um processo chave para a garantia de funcionamento do sistema que envolve o ciclo hidrológico, que tem como elemento fundamental a água. O objetivo geral deste trabalho foi analisar a distribuição da água, a partir da dinâmica de vazão e verificar o comportamento dos diversos processos hidrológicos perante as diferentes condições de uso e cobertura do solo. O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Apeú, localizada no nordeste paraense, se trata de uma bacia complexa, que está inserida em ambientes tanto rurais, quanto urbanos, e que sofre constantes intervenções antrópicas. Aplicou-se o modelo Soil and Assessment Tool (SWAT), utilizando dados climáticos de uma estação meteorológica, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e de dados geocartográficos provenientes de instituições como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária (EMBRAPA). Foi discutida ainda, a aplicabilidade do modelo SWAT como ferramenta complementar no gerenciamento de recursos hídricos, motivado pela busca de alternativas de conhecimento dos processos ocorridos na bacia hidrográfica do rio Apeú. Buscou-se também avaliar espacialmente a distribuição de água na bacia, através da simulação da produção de água (WYLD) gerada pelo modelo SWAT, durante o período de 2007 a agosto de 2018, foi realizada uma simulação de cenários com diferente uso e ocupação do solo, da bacia em estudo, e estes foram comparados com o cenário atual (TerraClass 2014). Com os resultados pode-se afirmar que o modelo SWAT pode gerar informações em bacias que não possuem monitoramento, sendo possível através dele, identificar a quantidade de WYLD, em função da diferença da água que entra no sistema (precipitação) em relação às suas perdas (evapotranspiração, e entre outras). E assim obter um melhor planejamento dos recursos hídricos na bacia em análise. Ao verificar que, a WYLD está intimamente ligada com a dinâmica dos usos e ocupações do solo e a morfometria da bacia do rio Apeú e não somente a sazonalidade das precipitações na região, então como estratégia de minimização dos impactos ambientais foi proposto uma cartilha de informações voltada para as questões ambientais com o intuito de informar a comunidade sobre a importância de se conservar o rio Apeú e com isso obter benefícios e qualidade de vida.

Palavras chaves: Modelagem Hidrológica. SWAT. Bacias Hidrográficas e vazão.

ABSTRACT

The preservation of a river basin is a key process to guarantee the functioning of the system that involves the hydrological cycle, whose fundamental element is water. The general objective of this work was to analyze the distribution of water, based on the flow dynamics and to verify the behavior of the different hydrological processes in the different conditions of use and soil cover. The study was developed in the watershed of the Apeú river, located in northeastern Para, is a complex basin, which is inserted in both rural and urban environments, and which suffers constant anthropic interventions. The Soil and Assessment Tool (SWAT) model was applied, using climatic data from a meteorological station, belonging to the National Institute of Meteorology (INMET), and geocartographic data from institutions such as the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) National Institute of Space Research (INPE) and the Brazilian Agricultural Research Company (EMBRAPA). It was also discussed the applicability of the SWAT model as a complementary tool in the management of water resources, motivated by the search for alternative knowledge of the processes occurring in the Apeú river basin. It was also sought to spatially evaluate the distribution of water in the basin, through the simulation of water production (WYLD) generated by the SWAT model, during the period from August 2007 to August 2018, a simulation of scenarios with different use and occupation of the soil, of the basin under study, and these were compared with the current scenario (TerraClass 2014). With the results it can be affirmed that the SWAT model is a help in the generation of information in basins that do not have monitoring, being possible through it, to identify the amount of WYLD, as a function of the difference of water entering the system (precipitation) in relation to their losses (evapotranspiration, among others). In order to obtain better planning of the water resources in the basin under analysis. By verifying that the WYLD is closely linked with the dynamics of the land uses and occupations and the morphometry of the Apeú river basin and not only the seasonality of precipitation in the region, then as a strategy to minimize environmental impacts an information booklet was proposed focused on environmental issues with the aim of informing the community about the importance of conserving the Apeú river and with this to obtain benefits and quality of life.

Keywords: Hydrological Modeling. SWAT. Hydrographic Basins and flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Capítulo I

Figura 1- Tipos de escoamento em uma bacia de drenagem.	21
Figura 2- Processo de funcionamento do modelo SWAT.	24
Figura 3- Localização da sub-bacia do rio Apeú, Pará, Brasil (A), destaque para a bacia de estudo, estação meteorológica, ponto de coleta de vazão e o exutório do rio Apeú (B).	26
Figura 4- MDE da área de estudo.	27
Figura 5- Mapa de tipo de solo.	28
Figura 6- Mapa de uso do solo.	30
Figura 7- Torre meteorológica, localizada dentro do Instituto Federal do Pará (IFPA) campus Castanhal.	32
Figura 8- Pontos de coletas.	32
Figura 9- Molinete Fluviométrico, modelo MLN – 7.	33
Figura 10- Ilustração do método da meia seção.	34

Capítulo II

Figura 1- Localização do rio Apeú, Pará, Brasil.	43
Figura 2- Processo de funcionamento do modelo SWAT.	46
Figura 3- Composição das unidades de resposta hidrológica (URH) a partir dos mapas de tipo de solo, cobertura vegetal e topografia.	50
Figura 4- Ranking dos parâmetros obtido com a análise de sensibilidade.	51
Figura 5- Comparação entre a vazão simulada (linha) e a vazão observada (circulo), no período de calibração (outubro a dezembro de 2017) do modelo SWAT e a precipitação (coluna) observada no período.	52
Figura 6- Ciclo Hidrológico anual simulado pelo modelo SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Apeú.	53

Capítulo III

Figura 1- (A) Vazão no período de calibração, (B) Vazão no período de validação do ponto 1 e (C) Vazão no período de validação do ponto 2.	64
Figura 2- Comportamento da média anual da precipitação no período de 2007 a agosto de 2018.	70
Figura 3- Gráficos do comportamento da produção e perdas de águas no período de 2007 a 2018.	72
Figura 4- Espacialização dos cursos e produção de água na bacia do rio Apeú.	74

Capítulo IV

Figura 1- Representação dos cenários I, II e III de uso e ocupação da terra.	84
---	----

Capítulo V

Figura 1- Cartilha informativa.	92
--------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1- Reclassificação das classes de uso do solo do TerraClass 2014 para as categorias de uso do solo disponíveis no banco de dados do modelo SWAT...31	
Tabela 2- Períodos de dados na fase de processamento e pós-processamento.	37

Capítulo II

Tabela 1- Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT e suas respectivas faixas de variação.	48
--	----

Capítulo III

Tabela 1- As referências de valores de Kc.	67
---	----

Capítulo IV

Tabela1- Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT e suas respectivas faixas de variação.	82
Tabela 2- Uso do solo para os três cenários (I, II e III).	86
Tabela 3- Processos hidrológicos simulados pelo Swat para os cenários I, II e II.	87
Tabela 4- Simulação da vazão anual com base nos cenários propostos para a bacia do rio Apeú.	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGLR - Áreas Antrópicas Agrícolas
APP - Áreas de Preservação Permanentes
ARS - Agriculture Research Service
COE - Coeficiente de Nash-Sutcliffe
CMR - Coeficiente de Massa Residual
Da - Desvio Padrão dos Erros
DV - Direção do Vento
EM - Erro Médio
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA - Estados Unidos da América
FRST - Floresta Mista
GLUE - Generalizada da Estimativa de Incerteza
HRU - Unidades de Respostas Hidrológicas
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM - Institute of Hydrology Distributed Model
IFPA - Instituto Federal do Pará
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LI - Linhas de Instabilidade
MGB-IPH - Modelos Hidrológicos de Grandes Bacias
MIN - Mineração
MNT - Modelo Numérico do Terreno
PAST – Pastagens
PARASOL - Solução de Parâmetros
PBIAS - Erro Sistemático Bias
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos
PO - Ponto de Orvalho
PRP - Precipitação
RS - Radiação Solar
SCS - Soil Conservation Service
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SHE - Système Hydrologique Européen
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
SSAR - Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation

SUFI-2 - Sequência de Montagem das Incertezas

SWAT - Soil and Water Assessment Tool

SWRRB - Simulator for Water Resources in Rural Basins

Tmax - Temperatura Máxima

Tmin - Temperatura Mínima

URBN - Áreas Urbanas

UR - Umidade Relativa

USDA - United States Department of Agriculture

USLE - Equação Universal de Perda de Solo

VV - Velocidade do Vento

WATR - Água

WYLD - Produção de Água

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 NÚCLEO ESTRUTURANTE: CONTEXTUALIZAÇÃO, REFERENCIAL TEÓRICO, MÉTODO E ESTRUTURA DA TESE.....	16
1.1 Introdução geral	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Dinâmica da água e a bacia hidrográfica do rio Apeú.....	20
2.2 O uso e ocupação do solo e suas implicações nos recursos hídricos.....	22
2.3 Modelagem e os modelos hidrológicos.	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Área de estudo	26
3.2 Coletas de dados	26
3.3 Análises dos dados	35
4 ESTRUTURA DA TESE	38
CAPÍTULO 2 O MODELO SWAT COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: UM EXEMPLO APLICADO NO RIO APEÚ, CASTANHAL/PA.....	39
1 INTRODUÇÃO	40
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1 Área de Estudo	42
2.2 Obtenções dos Dados	43
2.3 Processamentos dos dados: Modelo SWAT.....	45
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4 CONCLUSÃO.....	53
CAPÍTULO 3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NA BACIA DO RIO APEÚ ATRAVÉS DO MODELO SWAT	55

1 INTRODUÇÃO	56
1.1 Estudo hidrológico e a sua importância na distribuição de água na vila Apeú	58
2 MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1 Área de Estudo	60
2.2 Dados Obtidos	60
2.3 Validação do Modelo.....	62
2.4 Propagação do fluxo de água.....	65
2.5 Análise morfométrica	67
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4 CONCLUSÃO	75
CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A HIDROLOGIA DA BACIA	77
1 INTRODUÇÃO	78
2 MATERIAL E METÓDOS	79
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4 CONCLUSÃO	89
CAPÍTULO 5 CARTILHA INFORMATIVA	91
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO GERAL	105
REFERÊNCIAS	108

CAPÍTULO 1 NÚCLEO ESTRUTURANTE: CONTEXTUALIZAÇÃO, REFERENCIAL TEÓRICO, MÉTODO E ESTRUTURA DA TESE.

1.1 Introdução geral

As constantes transformações ocorridas na paisagem natural surgem das relações socioeconômicas e culturais estabelecidas pelo homem, essas interações implicam em mudanças de uso e cobertura do solo podendo causar impactos ambientais, como a perda de biodiversidade, a fragmentação de ecossistemas, a exploração de recursos naturais, a dispersão de poluentes, entre outros (SOUZA *et al.*, 2017, p.5). É notório que estes processos comprometem a estrutura das paisagens e conseqüentemente a sustentabilidade ambiental, pois provocam mudanças que às vezes é irreversível nos processos ecológico, especialmente nos fluxos energéticos, ciclo da água, carbono e nutrientes, prejudicando os serviços dos ecossistemas e o bem-estar humano (SANTOS, 2011, p. 77).

Uma discussão relevante quanto à deterioração dos ecossistemas naturais é a disponibilidade da água, uma vez que esse recurso é fundamental ao desenvolvimento humano e às suas atividades. As alterações do uso do solo relacionam-se também às condições do corpo hídrico, sendo um dos fatores de controle da dinâmica do ambiente, com ênfase no regime de vazões e transporte de sedimentos (NUNES, 2016, p. 22).

Levando em consideração os processos de mudanças de cobertura e uso do solo no entorno da bacia do rio Apeú/PA, autores como Pereira *et al.* (2012, p. 297), Santos (2006, p. 467), Souza (2010, p. 37) e Vale *et al.* (2015, p. 78) já apontavam alterações na dinâmica hidrológica do rio (aumento do escoamento superficial, da vazão, etc.), a qual era influenciada pelo desenvolvimento de atividades, como urbanização e expansão agrícola. Atualmente é possível visualizar que os efeitos decorrentes dessas alterações do espaço têm implicado em problemas, não somente referente ao ciclo hidrológico e os ecossistemas aquáticos, mas também no microclima, qualidade do ar, na saúde da população, entre outros.

No Brasil, com a aprovação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), também, chamada de "Lei das Águas", por meio da Lei no 9.433/97, tornaram-se conhecidas as "diretrizes gerais" que devem ser usadas para a gestão de recursos hídricos, além dos objetivos e fundamentos relacionados ao uso da água; dentre eles

talvez os mais evidentes, sejam o seu uso racional e sustentável, a fim de garantir o suprimento adequado de água em quantidade e qualidade para os usos atuais e futuros, e a consideração de que se trata de um bem de domínio público finito dotado de valor econômico (NUNES, 2016, p. 23).

Contudo, para o aproveitamento ser eficaz, no que diz respeito aos planos de gestão da água (previsto na PNRH), é necessário entender o comportamento da bacia do rio Apeú, seus fenômenos e as implicações geradas pelas mudanças do uso e cobertura do solo. Nesse contexto, a modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita conhecer a representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas (MAMÉDIO, 2014, p. 22), sendo que os modelos hidrológicos são importantes ferramentas para a análise e quantificação desses comportamentos, que dentre inúmeras funcionalidades, alguns modelos também, podem simular o transporte de sedimentos e substâncias, como agrotóxicos e nutrientes, em decorrência dos processos hidrológicos envolvidos, avaliando diversos efeitos nocivos como os problemas causados pela erosão (FERNANDES, 2016, p. 19).

A utilização dos modelos hidrológicos obteve notoriedade graças à economia de tempo e recursos devido à capacidade de realizar simulações de longo prazo dos efeitos do gerenciamento de bacias hidrográficas na quantidade e qualidade da água e qualidade do solo, atuando também na simulação de cenários de programas de conservação e no auxílio ao desenvolvimento de políticas mitigatórias para a degradação da qualidade do solo ou da água determinando a política de conservação adequada para as particularidades de cada bacia hidrográfica (MORIASI *et al.*, 2012, p. 1245).

Um modelo hidrológico requer uma vasta quantidade de informação para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia hidrográfica. Mas ainda, se o modelo levar em conta a variabilidade espacial dos processos como a infiltração, a evaporação e as características fisiográficas da bacia, a quantidade de informação requerida aumenta, pois cada unidade hidrológica será caracterizada pela sua topografia, geologia, clima, tipo e uso de solo (FELIZARDO, 2016, p. 43; FERRAZ *et al.*, 1999, p. 46; SANTOS *et al.*, 2006, p. 466).

Os modelos hidrológicos quando integrados a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), possibilitam conhecer espacialmente a magnitude dos impactos nos recursos hídricos, e de acordo com ele pode obter respostas de vazão de acordo com cenários de uso e cobertura do solo e com isso relacionar com os impactos ocorridos no entorno da bacia hidrográfica, contudo, essa relação acontece através da capacidade de

processamento de dados espaciais, tais como: modelos numéricos de terreno, mapeamentos de uso e ocupação de solo, dados climáticos, etc., que são inseridos em uma interface SIG, como o caso do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (FAN; COLLISCHONN, 2013, p. 250).

O modelo SWAT foi escolhido para esta pesquisa por ser, adequado à aplicação em bacias de qualquer porte, além dos aspectos quantitativos de escoamento e por que nele podem ser incluídas variáveis aos seus cálculos. O SWAT pode fazer projeção de cenários futuros para diferentes ocupações de solo e de fácil acessibilidade, possuindo uma grande disponibilidade de material e teve sua comprovação de aplicabilidade em vários estudos pelo mundo (LELIS, 2011, p. 286; MENDES, 2010, p. 82; SOUSA, 2010, p. 37).

Os cálculos realizados dentro do modelo SWAT são baseados na equação do balanço hídrico e na equação universal de perda de solo (USLE) (NEITSCH *et al.*, 2009, p. 260), em que, o ciclo da água participa de todo o processo, pois é capaz de realizar um movimento contínuo e dinâmico que transporta água de um lugar para outro, o qual é mantido pela energia solar e pela gravidade, por meio de diversos processos, como precipitação, evaporação, transpiração, sublimação, condensação, infiltração, escoamento superficial e etc. (BLAINSKI *et al.*, 2017, p. 235).

Os cenários gerados por meio dessa simulação possibilitam compreender os possíveis impactos e planejar melhor as mudanças de uso e cobertura do solo com o intuito de proporcionar um impacto ambiental menor e, conseqüentemente, uma produção mais sustentável, quando envolve a mudança da paisagem, se configura importante fonte de informação para auxiliar na gestão ambiental e no planejamento do uso do solo podendo, portanto, subsidiar políticas públicas e evitar impactos como: deterioração dos recursos hídricos, mudanças climáticas e degradação do solo (GALHARTE; VILLELA; CRESTANA, 2014, p. 194).

Diante disso, este trabalho surge da preocupação dos processos de intervenção do homem na área da bacia do rio Apeú, aonde seus ecossistemas vêm sofrendo inúmeras alterações, as quais têm causado perdas dos solos, aumento dos processos erosivos, e assoreamento dos cursos d'água, modificando assim toda dinâmica do local, bem como, o ciclo hidrológico da área.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar os impactos do uso e cobertura do solo no regime hidrológico, a partir da dinâmica de vazão, na bacia do Rio Apeú, através do Modelo Hidrológico SWAT.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar a aplicabilidade do modelo SWAT como ferramenta complementar no gerenciamento de recursos hídricos.
- Representar o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Rio Apeú, através do modelo.
- Avaliar espacialmente a distribuição de água na bacia do rio Apeú, através da simulação da produção de água (WYLD) gerada pelo modelo SWAT, durante o período de 2007 a agosto de 2018.
- Simular através do modelo SWAT, cenários alternativos de uso e ocupação do solo, na bacia hidrográfica do rio Apeú, e compará-lo com o cenário de uso e cobertura do solo atual.
- Propor uma cartilha de informações voltada para as questões ambientais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dinâmica da água e a bacia hidrográfica do rio Apeú

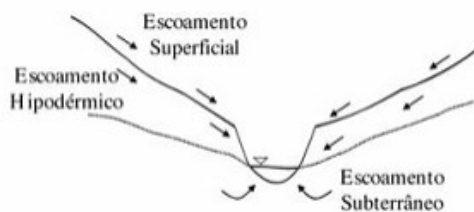
A circulação da água é caracterizada pelo mecanismo de sua transferência contínua existente no planeta, e estas movimentações, ocorrem devido os processos que envolvem o ciclo hidrológico, dentre eles a precipitação, a evapotranspiração, a percolação, o escoamento superficial e subterrâneo, etc. sendo a precipitação de fundamental valor, pois ela é o fator principal de entrada de água em uma bacia hidrográfica (LÖBLER, 2013, p. 14).

Diante disso, a bacia hidrográfica é conceituada como uma área de captação natural de água, proveniente da precipitação, que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, seu exutório, e que considera perdas intermediárias, os volumes evaporados, transpirados, os infiltrados profundamente e os escoados superficialmente (SANTOS, 2016, p. 13).

A movimentação da água no contexto de uma bacia pode ser descrita a partir do momento em que as chuvas precipitam, infiltrando nos solos até haver a saturação superficial destes, o que conseqüentemente leva ao escoamento superficial. De tal modo, a água recolhida pelas vertentes é destinada de imediato a rede de drenagem, que se encarrega de transportá-la à seção de saída da bacia. Na maioria das vezes, a seção de saída é a foz de um rio principal responsável pela coleta de toda água produzida pela bacia (BARROS *et al.*, 2016, p. 15; KARMANN, 2000, p. 128; SILVEIRA, 2001, p. 120).

Dentro da dinâmica de uma bacia hidrográfica podem ser notados três tipos básicos de escoamento responsáveis pela contribuição hídrica dos rios receptores do processo de drenagem: o superficial (deslocamento da água na superfície da terra), o hipodérmico (o fluxo se dar logo abaixo da superfície, na altura das raízes da vegetação) e o subterrâneo (o fluxo mais profundo, contribuindo com os aquíferos) (Figura 1). Nota-se, então, que a renovação das águas dos cursos irá depender não só do devido escoamento superficial, mas também da facilidade de infiltração da água no solo. Estes aspectos de movimentação da água (escoamento superficial e infiltração) estão condicionados a diferentes fatores que podem alterar a dinâmica hídrica (BARROS *et al.*, 2016, p. 14; LIMA, J.; LIMA, I., 2010, p. 160).

Figura 1- Tipos de escoamento em uma bacia de drenagem.



Fonte - Barros *et al.* (2016, p. 14).

Ao entender a bacia hidrográfica como um espaço tridimensional que integra diversas interações é possível destacar algumas características fisiográficas que influenciam diretamente na dinâmica das bacias hidrográficas, dentre elas: os tipos de solo; topografia; vegetação; a forma geométrica; as redes hidrográficas; níveis de precipitação; uso e ocupação do solo; entre outros.

Neste sentido, cada bacia hidrográfica desempenha um papel importante nos moldes da ocupação territorial dentro do raio de sua abrangência, já que essas configurações definem diferentes padrões de drenagem e, por conseguinte, combinações de padrões que, podem caracterizar-se numa unidade territorial facilitadora das atividades desenvolvidas pelas sociedades locais ou, ao contrário, combinar ações que comprometem certos tipos de ocupação (ROCHA; VIANNA, 2006, p. 27).

A bacia hidrográfica do rio Apeú/ PA desempenha um importante função, tanto ambientais, quanto para a população que depende dela, a qual é considerada uma bacia complexa, por ser inserida atualmente em ambientes tanto rurais, quanto urbanos, e que sofre constantes intervenções antrópicas, devido os diferentes usos dos solos existentes em seu entorno. Por ser o principal rio que atravessa a Vila Apeú, vem sofrendo modificações desde o surgimento da mesma, em 1885, com a construção da estrada de ferro Belém – Bragança acarretando um inchaço populacional na região, decorrente da falta de trabalhadores locais, era vista como símbolo de prosperidade, modernidade e riqueza (SMITH JUNIOR, 2012, p. 16).

Apesar da construção da estrada de ferro ter trazido consigo a facilidade na logística no escoamento da produção da época, a utilização desordenada e despreocupada da bacia hidrográfica como meio de transporte, resultou em danos, ao solo, a fauna e a flora (MORAES FILHO, 2013, p. 15). Autores como, Vale, Bordalo e Fonseca (2015, p. 79) apontaram em sua pesquisa que o crescimento populacional entre os anos de 1991 e 2010, aumentou em aproximadamente 48,3%, refletindo na mudança

do uso do solo, em que antes eram vistas florestas nativas, notando-se o crescimento no número de áreas destinadas a pastagens, inclusive invadindo áreas de preservação permanentes (APPs).

A bacia hidrográfica do Rio Apeú é muito utilizada pela população para diversas atividades do dia a dia, como higiene pessoal, lazer, consumo e a irrigação, além de ser utilizada por décadas como meio de escoamento da produção agrícola. Uma região que possui grande importância econômica, social e ambiental os seus múltiplos usos da água alteram as características físico-químicas e ambientais, não apenas dos corpos hídricos, mas também de suas margens e entorno. Sendo assim, são poucos os cursos fluviais que ainda mantêm suas condições naturais preservadas (VARGAS; JÚNIOR, 2012, p. 165).

2.2 O uso e ocupação do solo e suas implicações nos recursos hídricos.

A alteração das características dos recursos hídricos superficiais esta relacionada, em parte, ao uso e ocupação do solo, a alteração do ambiente em função das pressões econômicas e sociais são causas agravantes na disponibilidade e qualidade de tais recursos. As bacias hidrográficas possuem diferentes conformações em relação aos usos e ocupações do solo, distinguindo-se principalmente como urbanas e rurais de forma que cada uso apresenta as suas características; como tipo de solo, atividade desenvolvida, entre outros (NUNES, 2016, p. 1).

O regime hídrico é afetado pelo rápido crescimento urbano, o qual, quando não planejado modifica o processo de impermeabilização, provocando o aumento do volume escoado superficialmente e os picos de vazões, contudo diminui o nível do lençol freático. A falta de saneamento básico afeta diretamente a qualidade das águas receptoras. Associados ao uso e ocupação do solo, a fragmentação da paisagem é também uma das principais causas da degradação da qualidade da água. Considerando que o homem interfere e transforma os ecossistemas, hoje não é mais possível pensar em paisagem sem considerar a presença humana no conceito, na estrutura e na dinâmica da paisagem (SIQUEIRA *et al.*, 2013, p. 559).

Não somente em áreas urbanas, mas modifica também em áreas que ocorrem a conversões de florestas em outros usos, como mostra Baker e Miller (2013, p.110), em um estudo no rio Njoro, no leste da África, o qual buscou avaliar o impacto do uso do solo nos recursos hídricos e obteve como resultado um aumento no escoamento superficial, padrão coincidente com as mudanças significativas no uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica, resultante da conversão das florestas em áreas agrícolas.

Ainda segundo os autores, em áreas agrícolas, o desmatamento é um dos aspectos complicadores, o solo descoberto torna-se vulnerável à erosão, ocorre o empobrecimento do solo nativo e redução de reservas de água no solo e aumento na produção de sedimentos. Além da modificação no regime hídrico causada pela retirada da vegetação nativa e implementação de culturas agrícolas, a qualidade dos recursos hídricos também é afetada, pois ocorre o aporte de grandes quantidades de solo, matéria orgânica e insumos agrícolas para o leito dos rios nos eventos chuvosos.

A compreensão dos processos de qualidade da água e fluxo em ambientes complexos tem motivado o desenvolvimento de pesquisas e estudos com a aplicação de modelos com o objetivo de obter uma percepção mais precisa da dinâmica hídrica em bacias hidrográficas (NUNES, 2016, p. 8).

2.3 Modelagem e os modelos hidrológicos.

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo (MARTINS, 2017, p. 6; TUCCI, 1998, p. 669). Um modelo hidrológico pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem a mesma, na medida em que permitem a simulação de possíveis alterações na bacia (ANESI, 2014, p. 16).

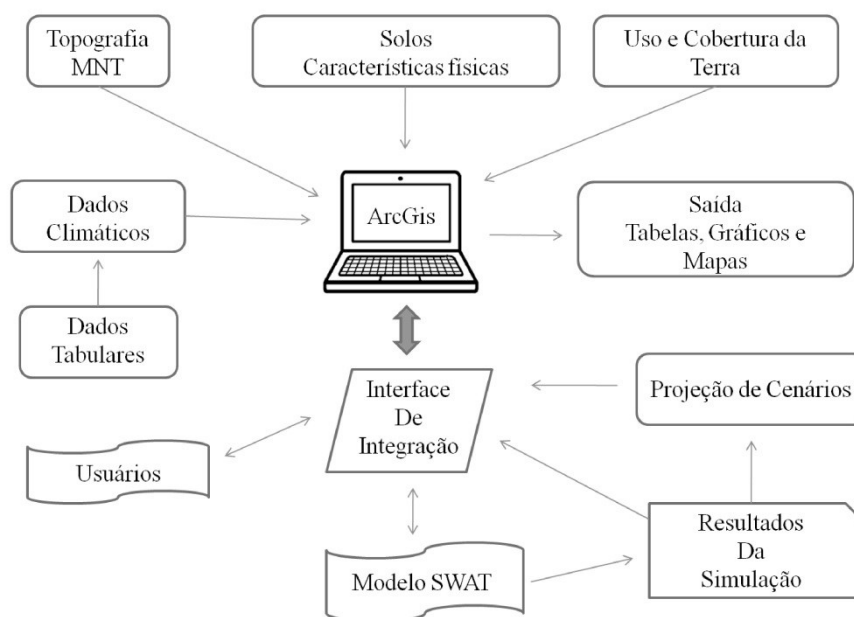
Existem diversos tipos de modelos hidrológicos, desde os mais simples, que envolvem apenas o balanço hídrico até os mais sofisticados que utilizam interface de SIG e buscam representar não apenas a quantidade de água, mas também a qualidade da água e a produção de sedimento nas bacias.

Dentre os modelos hidrológicos de bacias hidrográficas disponíveis destaca-se o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), criado no início dos anos 90, por Jeff Arnold do ARS (Agriculture Research Service) da USDA (United States Department of Agriculture) foi criado para ser uma ferramenta de análise do impacto das ações humanas nos processos hidrológicos e químicos que ocorrem nas bacias dos EUA. Ele incorpora vários componentes principais: hidrologia, clima, sedimento, temperatura do solo, crescimento da flora, nutriente e gestão de uso de solo agrícola, entre outros (MENDES, 2010, p. 54).

É um modelo de domínio público e de fonte aberta e integrada que permite ao usuário utilizar conforme sua necessidade. Tem base física e contínua, opera de forma diária, com o objetivo de prever o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos, aportes de nutrientes e etc. (CARVALHO, 2014, p. 29).

O Funcionamento do modelo SWAT para as simulações de cenários ocorrem basicamente pelas entradas de dados, em que primeiramente é inserido o Modelo Numérico de Terreno, onde a partir deste é delimitado bacia hidrográfica e posteriormente, são inserido dados climáticos e características do solo, como o tipo, uso e ocupação do solo. Esses dados são tratados e organizados, e em seguida com a utilização de um SIG são inseridos no modelo (Figura 2).

Figura 2- Processo de Funcionamento do Modelo SWAT.



Fonte - Adaptado de Sousa (2010, p. 66).

Essa interface é capaz de fazer conversões dos dados geoespaciais de uso e tipo de solo para o banco de dados, onde as informações necessárias para cada tipo de solo dizem respeito a características físico-hídricas, tais quais: grupo de saturação referente ao método da Curva-Número, a profundidade de raiz, porosidade, profundidade da camada, densidade aparente, água disponível no solo, condutividade hidráulica saturada, erodibilidade, albedo, carbono orgânico (LELIS, 2011, p. 295; VEIGA, 2014, p. 83) e percentagem de argila, silte, areia e seixo (VEIGA; OLIVEIRA; SIQUEIRA, 2015, p. 3817), encontrando combinações únicas destes dois aspectos e obedecendo a intervalos de declividade definidos pelo usuário. É no âmbito da área de uma Unidade de Resposta

Hidrológica (URH - subdivisões de cada sub-bacia que possuem uma única combinação de uso do solo, tipo de solo e classe de declividade) que o SWAT procede com suas simulações (FERNANDES, 2015, p. 62).

Ele também possui um gerador de dados climáticos (velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar) para fornecimento de algumas variáveis para suas simulações. Enquanto ferramenta de pós-processamento a interface é capaz de proceder a comum a organização estrutural dos resultados promovendo visualização objetiva com diversos arquivos de saída (NUNES, 2013, p. 48).

A análise de sensibilidade é o estudo de como um modelo responde, quantitativamente e qualitativamente, a diferentes variações nas informações que o alimenta, permitindo a validação da relação de dependência entre os resultados simulados. Possuindo como objetivo principal da análise investigar como o modelo responde a variação nos valores de seus parâmetros, permitindo identificar aqueles, ao qual o modelo não é tão sensível (SILVA; ZAIDAN, 2010, p. 363).

Perazzoli *et al.* (2013, p. 860) identificou que o modelo SWAT é sensível a mais de 100 variáveis relacionadas à vegetação, manejo da terra, solos, clima, aquífero, canal e reservatório. A avaliação de desempenho do modelo SWAT é fundamental para a avaliação da eficiência da simulação, e conseqüentemente para o uso operacional na gestão dos recursos hídricos. A verificação do desempenho do modelo pode ser obtida a partir dos valores observados e simulados, calculados com base nos seguintes métodos estatísticos: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (Nash and Sutcliffe, 1970, p. 286), o desvio padrão dos erros (Da), o erro médio (EM) e o coeficiente de massa residual (CMR) (SOUSA, 2010, p. 73). A calibração é um processo importante, pois os parâmetros são ajustados sistematicamente no modelo.

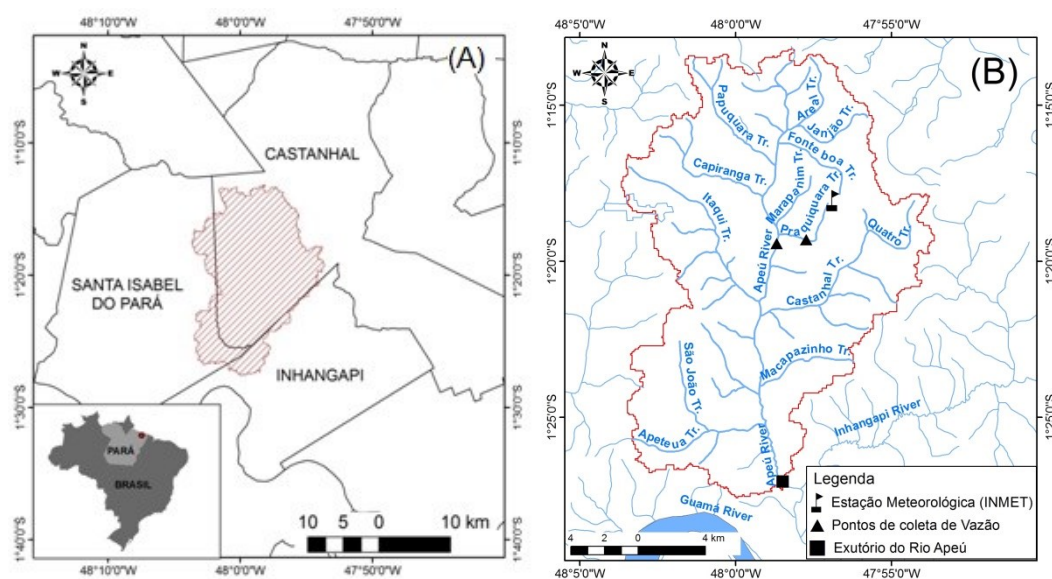
O SWAT é reconhecido internacionalmente como uma robusta e interdisciplinar ferramenta de modelação de bacias hidrográficas, o que é evidenciado pelas conferências anuais internacionais sobre SWAT, e publicações relacionadas ao modelo apresentadas em diversos encontros científicos e revistas científicas. O desenvolvimento primário do modelo enfatiza principalmente impactos do clima e práticas de manejo, carga para a qualidade de água e sua destinação, flexibilidade na discretização de bacias e simulação de tempo contínuo. E graças aos avanços na tecnologia tem comprovado ser uma ferramenta flexível que pode ser aplicada para simular diversos problemas em uma bacia hidrográfica (KUWAJIMA *et al.*, 2011, p. 134).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Apeú, localiza-se no nordeste do Pará, nas confluências dos municípios de Castanhal, Santa Isabel do Pará e Inhangapi, uma das suas principais nascentes está localizada na fazenda Buriti, no município de Castanhal e a sua foz no rio Inhangapi, que juntos deságuam no rio Guamá. Com uma área de aproximadamente 307 Km², possui como afluentes os igarapés Macapazinho, Castanhal, Americano, Janjão, Fonte Boa, Marapanim, Taiteua, Papuquara, Capiranga, Itaqui e São João (FERREIRA, 2003, p. 10; JESUS, 2009, p. 33; SANTOS, 2006, p. 468; SOUZA, 2010, p. 22) (Figura 3).

Figura 3- Localização da sub-bacia do rio Apeú, Pará, Brasil (A), destaque para a bacia de estudo, estação meteorológica, ponto de coleta de vazão e o exutório do rio Apeú (B).



Fonte - Autor.

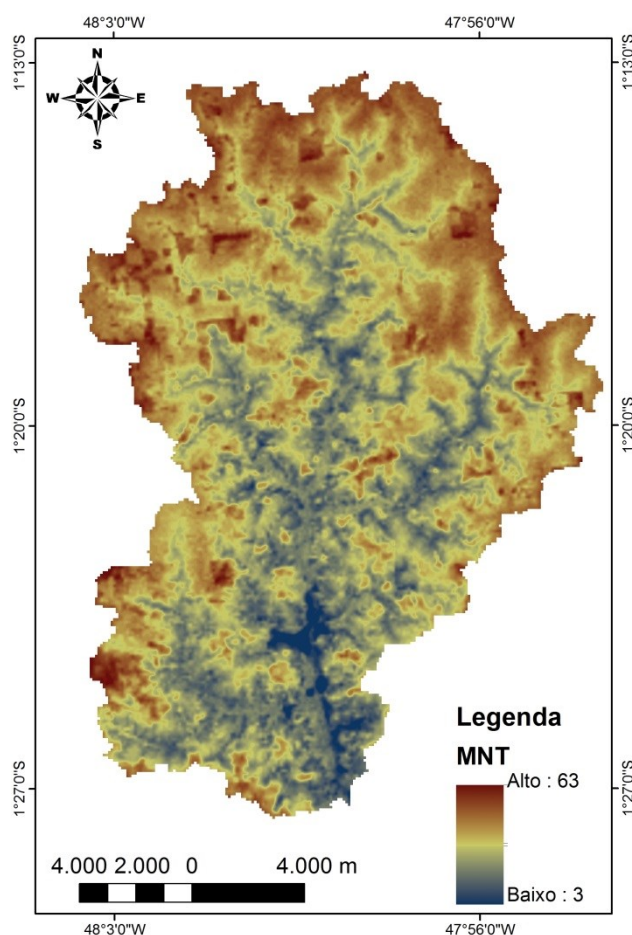
3.2 Coletas de dados

Os dados consistidos nesta pesquisa partiram de diversas fontes, as quais são necessárias para a construção do banco de dados de entrada (*input*) compostos pelo: Modelo Numérico de Terreno (MNT); Tipo e Uso do Solo; Dados Climáticos e Vazão.

Modelo Numérico de Terreno

O MNT da área da bacia foi obtido gratuitamente do site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a partir de imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m. Posteriormente foi transformada em uma imagem raster, de resolução espacial de 5 m, na escala de 1:25.000. O MNT contém informações sobre declividade média, o qual mostra intervalos de classes que representam as altitudes, de acordo com as variações de cores, variando de 3 metros a 63 metros de altitude, em que as de maiores altitudes aparecem nas extremidades da bacia, enquanto as de baixa altitude estão por onde passam as redes de drenagem (Figura 4).

Figura 4- MNT da área de estudo.

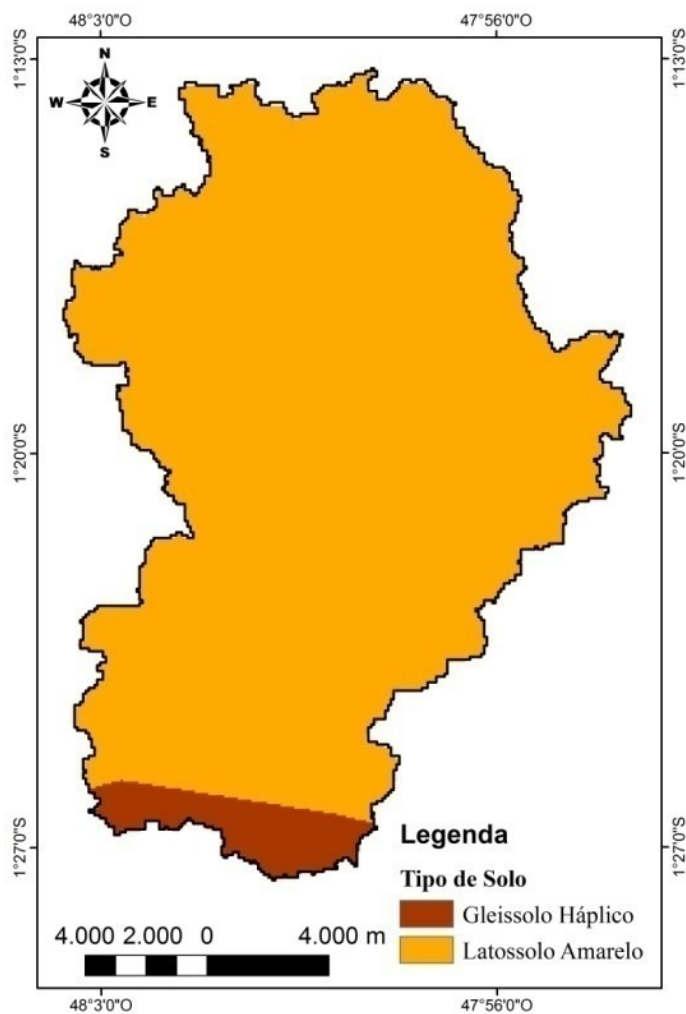


Fonte - EMBRAPA (2018).

Tipo de Solo

O tipo do solo foi determinado a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aonde foi encontrada duas classes de solos, distribuídos da seguinte forma: 92% Latossolo Amarelo e 8% Gleissolo Háplico (Figura 5).

Figura 5- Mapa de tipo de solo.



Fonte - IBGE (2015).

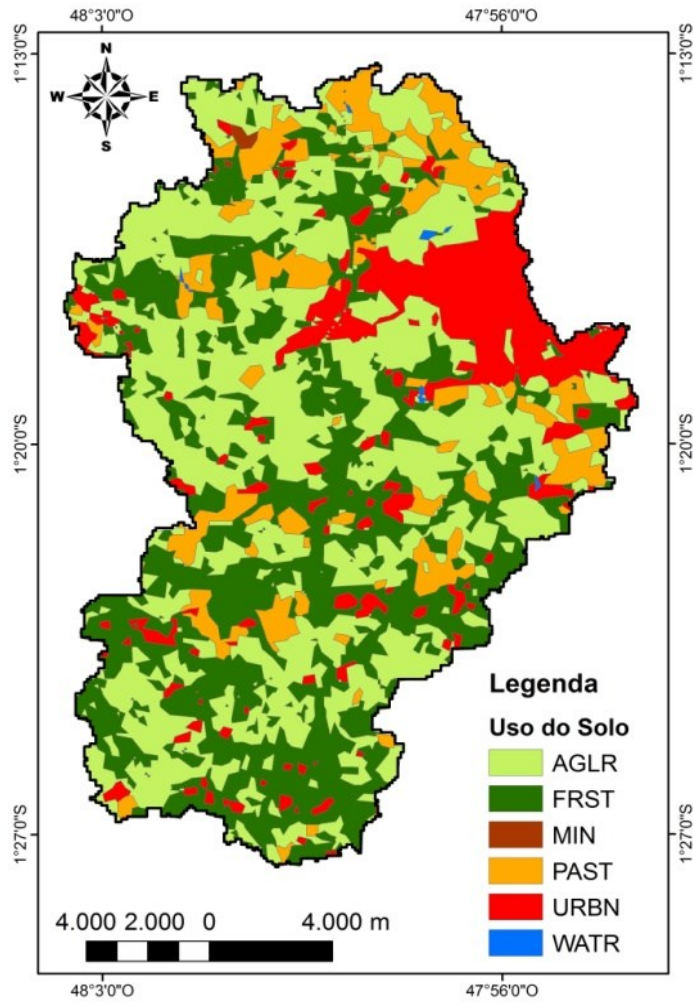
- Latossolo Amarelo: Solos profundos, de coloração amarelada, perfis muito homogêneos, com boa drenagem e baixa fertilidade natural, em sua maioria, que apresentam como principal característica o horizonte subsuperficial B latossólico Bw, com espessura mínima de 50 cm, textura franco arenoso ou mais fino e baixos teores de siltes, de maneira que a relação siltes/argila seja inferior a 0,7 nos solos de textura media e inferior a 0,6 nos de textura argilosa, na maioria dos sub-horizontes do B ate a profundidade de 200 cm (IBGE, 2015, p. 193).

- Gleissolo Háptico: São solos característicos de áreas alagadas ou sujeitas a alagamento (margens de rios, ilhas, grandes planícies e etc.). Apresentam cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, dentro de 50 cm da superfície. Podem ser de alta ou baixa fertilidade natural e tem nas condições de má drenagem a sua maior limitação de uso. São solos minerais hidro mórficos, mal drenados, desenvolvidos de sedimentos recentes, sob forte influencia do lençol freático, com horizontes dispostos na sequência A e Cg, ou A, Bg e Cg. A textura e predominantemente argilo-siltosa, com valores altos de siltes e argila, devido a constante sedimentação de materiais finos que são conduzidos em suspensão pelos rios (IBGE, 2015, p. 293).

Uso do Solo






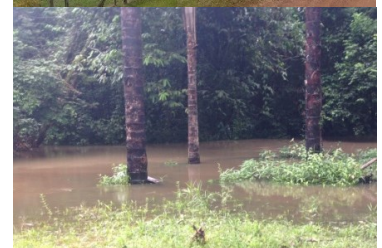
Com relação aos dados de uso do solo, o mapa foi elaborado com base no projeto TerraClass 2014, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (ALMEIDA *et al.*, 2016, p. 301), reclassificada com base no banco de dados do modelo Hidrológico SWAT (Tabela 1). As Áreas Antrópicas Agrícolas (AGLR) recobrem 41% da área; As Áreas Urbanas (URBN) recobrem 12%; As Pastagens (PAST) recobrem 11%; A Floresta Mista (FRST) recobre 35%; A Mineração (MIN) e s corpos hídricos (WATR) ocupam menos de 1% da área (Figura 6).

Figura 6- Mapa de uso do solo.



Fonte - TerraClass; INPE (2014).

Tabela 1- Reclassificação das classes de uso do solo do TerraClass 2014 para as categorias de uso do solo disponíveis no banco de dados do modelo SWAT.

Classes encontradas no TerraClass 2014		Classes reclassificada no banco de dados SWAT
Agricultura anual + Área não observada		Área Agrícola Antrópica (AGRL)
Floresta + Vegetação secundária		Floresta Mista (FRST)
Mineração		Mineração (MIN)
Pasto sujo + Pasto Limpo + Regeneração com Pasto		Pastagem (PAST)
Área Urbana + Mosaico Urbano		Área Urbana (URBN)
Hidrografia		Água (WATR)

Fonte - Autor.

Clima

Os dados climáticos utilizados foram de temperatura máxima e mínima (Tmax e Tmin), velocidade e direção do vento (VV e DV), umidade relativa (UR), radiação solar (RS), ponto de orvalho (PO) e precipitação (PRP), no período de janeiro de 2007 a

agosto de 2018, obtidos de uma estação automática meteorológica, do Instituto nacional de meteorologia (INMET) localizada no município de Castanhal/PA (Figura 7).

Figura 7- Estação meteorológica automática, localizada dentro do Instituto Federal do Pará (IFPA) campus Castanhal.



Fonte - INMET (2019).

Vazão

As medições de vazões (através da descarga líquida) foram realizadas em dois pontos de amostragem, P1 (no rio principal) e P2 (no afluente contribuidor) (Figura 8), através do método convencional, com a utilização do molinete hidrométrico para a determinação da área e da velocidade média do fluxo que passa pela seção transversal dos pontos monitorados.

Figura 8- Pontos de coletas.



(P1)



(P2)

Fonte - Autor.

O método convencional utilizando o molinete hidrométrico é universalmente utilizado para determinação de vazão em cursos d'águas naturais e artificiais (canais), e consiste em determinar a área da seção e a velocidade média do fluxo de água que passa pela seção. O molinete hidrométrico é um aparelho que serve para medir a velocidade do escoamento (ALMEIDA, 2015, p. 25) (Figura 9).

Figura 9- Molinete fluviométrico, modelo MLN – 7.



Fonte - Autor.

As medições em campo foram feitas durante o período de Outubro de 2017 a Agosto de 2018 (com uma frequência de coletas de três vezes por semana). Baseando-se no método de medição a vau (medição realizada por um observador que atravessa o curso de água a pé medindo profundidades e velocidades, indicados para rios de pequena largura e pouca profundidade), em que as de medições em P1 foram (40 m, 60 m e 80 m) com 7,50 metros de distância e P2 foram (0,14 m, 0,14 m e 0,11 m) com 2,20 metros de distância.

O cálculo do número de rotações por segundo ($N(rps)$), pode ser realizado a partir da (Equação 1):

$$N = \frac{n}{i} \quad (1)$$

Onde,

N = Número de rotação por segundo;

n = Número de rotações registradas durante intervalo de tempo;

i = Intervalo de tempo de medição da velocidade (s).

Os cálculos de conversão entre os números de rotações por segundo para os valores de velocidade foram feitas através da equação do molinete, a qual é fornecida pelo fabricante do aparelho, esta equação é calibrada para cada molinete de forma individual e somente pode ser usada para o aparelho calibrado, geralmente da forma (Equação 2):

$$V = axN + b \quad (2)$$

Onde,

V = Velocidade;

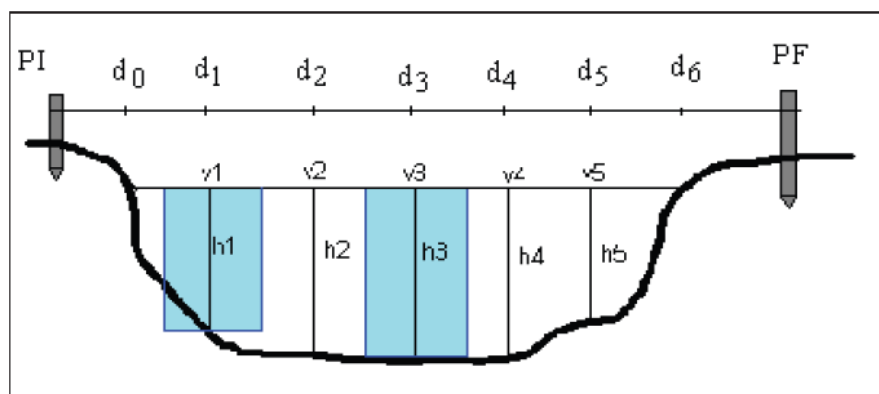
a = Passo da hélice;

b = Inércia da hélice;

N = Número de rotação por segundo.

A vazão foi calculada pelo método da meia seção, que consiste no cálculo das vazões parciais, por meio da multiplicação da velocidade média na vertical pelo produto da profundidade média na vertical e pela soma das semidistâncias às verticais adjacentes (vazão parcial determinada para cada região de influência de uma determinada vertical) (ANA, 2016, p. 25) (Figura 10).

Figura 10- Ilustração do método da meia seção.



Fonte - Back (2006, p. 100).

A equação da vazão parcial é (Equação 3):

$$q_i = v_i h_i \left(\frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2} \right) \quad (3)$$

Onde,

q_i = Vazão na seção i (m^3/s);

v_i = Velocidade média na vertical i (m/s);

h_i = Profundidade da vertical i (m);

d_{i+1} = Distância a partir do PI até a vertical posterior (m);

d_{i-1} = Distância a partir do PI até a vertical anterior (m).

E a vazão total (Equação 4):

$$Q = \sum_i^n q_i \quad (4)$$

3.3 Análises dos dados

Os dados coletados foram tratados nos softwares ArcGis 10.3 e Excel e posteriormente foram inseridos no SWAT no formato de raster (MDE, Tipo e uso do solo) e tabelas (dados climáticos e vazão).

3.3.1 Modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

As descrições a seguir constituem um resumo das etapas utilizada pelo SWAT e se fundamentam principalmente nos manuais elaborados por NEITSCH *et al.* (2005 b; 2005 c, p. 1-494).

O modelo hidrológico SWAT requer a execução sequencial de etapas que se iniciam com a inserção no modelo dos dados de entrada, que processa e gera resultados parciais, antes da simulação propriamente dita. Após a simulação, procede-se às etapas de pós-processamento. O último procedimento é a validação do modelo, etapa na qual o modelo calibrado será testado com uma série independente de dados observados (CARVALHO, 2014, p. 108).

Após o delineamento e a discretização da bacia hidrográfica do rio Apeú, a partir do MNT, foram criadas as HRUs, O modelo possui três critérios de geração de HRUs: classe predominante; HRU predominante e HRUs múltiplas. No primeiro e segundo critérios, cada sub-bacia é representada por apenas uma HRU, enquanto no terceiro critério, são geradas múltiplas HRUs para uma mesma sub-bacia (DE OLIVEIRA BUENO *et al.*, 2017, p. 120). Neste estudo optou-se por HRU predominante.

O período de simulação foi o de Janeiro de 2007 a agosto de 2018, em que se utilizou os dois primeiros anos (2007 e 2008) como períodos de aquecimento (warm up), Arnold *et al.* (2012, p. 1502) recomenda que seja efetuado um período de aquecimento de um ou mais anos ao efetuar simulações, com o intuito de garantir que o ciclo hidrológico seja simulado adequadamente.

Nesse sentido, a simulação inicial (modo de default) foi avaliada no período de janeiro de 2009 a agosto de 2018, com o propósito de analisar estatisticamente o

comportamento da vazão simulada pelo modelo. Já a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo ocorreram através do SWATCUP, o qual inclui: Probabilidade Generalizada da Estimativa de Incerteza (GLUE) (BEVEN; BINLEY, 1992), Solução de Parâmetros (PARASOL) (VAN GRIENSVEN; MEIXNER, 2006, p. 56), e Sequência de Montagem das Incertezas (SUFI-2) (ABBASPOUR *et al.*, 2007, p. 420). Cujo objetivo é integrar diversas calibrações e análise de procedimentos de incertezas para SWAT em uma única interface.

Em que neste estudo utilizou-se SUFI-2, em que Abbaspour (2013) comenta que este envolve os parâmetros de incertezas em modelos hidrológicos. Nele o parâmetro de incerteza é descrito com uma variedade na distribuição uniforme do parâmetro hypercube, em que a amostragem por Latin hypercube é utilizado para traçar o parâmetro independente fixo (Abbaspour *et al.*, 2007, p. 417).

O grau para que toda incerteza seja contabilizada é quantificada por uma medida referida como P-factor, que é a porcentagem de dados delimitados pela previsão de 95% de incerteza (95PPU) (Abbaspour, 1997, p. 1886). Outra medida de quantificação da análise da calibração/incerteza é o R-Factor que é a espessura média do 95PPU dividido pelo desvio padrão dos dados medidos. No método SUFI-2, o P-Factor vai de 0 a 100% e o R-Factor de 0 ao ∞ . A combinação com P-Factor igual a 1 e R-Factor igual a zero, corresponde exatamente aos dados medidos. No entanto, um balanço entre os dois fatores deve ser feito (Abbaspour, 2011, p. 324).

Após a análise de sensibilidade, foi realizada a calibração e validação, assim os períodos de dados para estas etapas do modelo foram de outubro de 2017 a março de 2018 e de abril a agosto de 2018, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2 - Períodos de dados na fase de processamento e pós-processamento.

Período dos Dados	Utilização	Etapas
Janeiro de 2007 a Agosto de 2018	Dados climáticos	Processamento
Janeiro de 2007 a Dezembro de 2008	Aquecimento	
Outubro de 2017 a Março de 2018	Análise de Sensibilidade e Calibração	Pós-Processamento
Abril a Agosto de 2018	Validação	

Fonte - Autor.

A fase de verificação do modelo SWAT é fundamental para a avaliação do desempenho da simulação, assim, foram utilizadas as funções objetivo: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS_{Ef}) (NASH and SUTCLIFFE, 1970, p. 282) (que varia do $-\infty$ até 1), o coeficiente de determinação R^2 (que varia de 0 a 1), e o PBIAS (Erro Sistemático Bias) (%), que avalia a tendência média dos valores simulados serem maiores (subestimativa) ou menores (superestimativa) do que os observados, sendo o seu valor ideal próximo e/ou igual a 0 (DE OLIVEIRA BUENOS *et al.*, 2017, p. 114). Sendo estas estatísticas amplamente utilizadas em estudos relativos à modelagem computacional que envolve o uso do programa SWAT.

4 ESTRUTURA DA TESE

Essa tese está dividida em 5 capítulos. No primeiro foi apresentada uma contextualização, referencial teórico e a metodologia de forma geral. Já no segundo capítulo foi aplicado o modelo SWAT como ferramenta complementar no gerenciamento de recursos hídricos, usando como exemplo a bacia hidrográfica do Rio Apeú, demonstrando que é possível a utilização desse modelo na obtenção de informações sobre a dinâmica de uma bacia. Através das variáveis climáticas, tipo e uso do solo, foi simulado o balanço hídrico, no modo padrão do modelo SWAT, em que nesta etapa, realizou-se a análise de eficiência do modelo durante a calibração. Nesse sentido, os resultados mostram que o modelo pode auxiliar na geração de informações em áreas que não possuem monitoramento e assim obter um melhor planejamento dos recursos hídricos para as bacias, comprovados pelas análises do modelo e trabalhos de campo.

No terceiro capítulo foi avaliada a distribuição espacial da produção de água (WYLD) simulada pelo SWAT, no período de 2007 a 2018, na bacia do Rio Apeú, em que foi perceptível que a WYLD está intimamente ligada com a dinâmica dos usos e ocupações do solo e a morfometria da bacia do rio Apeú, e não somente a sazonalidade das precipitações na região. Ainda, em decorrência das mudanças sofridas pela bacia ocasionaram um aumento das perdas de água e diminuição da sua produção o que pode ser prejudicial à população que dependem da bacia, para a pesca, transporte, entre outros.

No quarto capítulo foram simulados cenários, a partir do modelo SWAT, na bacia e com isso, foi verificado o comportamento dos processos hidrológicos a partir de diferentes condições de uso e cobertura do solo. Em que foi demonstrado a eficiência do modelo em representar o regime hidrológico da área estudada para todos os cenários avaliados.

Partindo dos problemas encontrados nesses cenários projetados, o capítulo cinco compõem uma cartilha com objetivo de informar a comunidade sobre as questões ambientais e a importância de se conservar o rio Apeú e com isso obter benefícios e qualidade de vida.

E por fim, o capítulo seis trata-se das considerações finais da tese.

CAPÍTULO 2 O MODELO SWAT COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: UM EXEMPLO APLICADO NO RIO APEÚ, CASTANHAL/PA¹

RESUMO

O gerenciamento dos recursos hídricos tem impulsionado pesquisas, que buscam alternativas de conhecimento dos processos que ocorreu em bacias hidrográficas. Diante disso, este estudo teve como objetivo aplicar o modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool) como ferramenta complementar para o gerenciamento de recursos hídricos. O modelo foi utilizado na bacia do Rio Apeú, de 2009 a 2017, para a obtenção de informações sobre a dinâmica do ciclo hidrológico, a partir das variáveis climáticas, tipo e uso do solo, estas informações podem auxiliar no planejamento da gestão dos recursos hídricos. Durante a calibração do modelo, foi obtida uma boa eficiência (Nash-Sultcliffe) com um valor de 0,89, que foi alcançada pela correlação ($R^2 = 0,99$) entre os valores simulados e observados e pelos baixos valores de erro durante a simulação da vazão. Estes resultados mostram que o modelo pode auxiliar na geração de informações em áreas que não possuem monitoramento e assim obter um melhor planejamento dos recursos hídricos para as bacias.

Palavras-chave: Modelagem; Hidrologia; Geoprocessamento e Vazão.

ABSTRACT

The water resources management has driven researches, which search for alternatives to the understanding about processes occurring in river basins. Therefore, this study aimed to apply the SWAT model (Soil & Water Assessment Tool) as complementary tool for water resources management. The model was used in Apeú River Basin, from 2009 to 2017 to obtain information on the hydrological cycle dynamics based on climatic variables, type and land use. This kind of information can help in the planning of water resources management. During the model calibration, it obtained good efficiency (Nash-Sultcliffe) with a value of 0.89 which was achieved by the correlation ($R^2 = 0.99$) between the simulated and observed values and by the low error values during the flow

¹Artigo publicado em 19/04/2018 na Revista de Gestão de Água da América Latina, Qualis B2, em Ciências Ambientais.

simulation. These results showed that the model can help in the generation of information for areas without monitoring, and consequently it can help the best planning of water resources for basins.

Keywords: Modeling; Hydrology; Geoprocessing and Flow

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se compreender o funcionamento do comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica e os processos que controlam tanto o movimento da água, quanto os impactos de mudanças do uso do solo, sobre a quantidade e qualidade da água (MARINHO FILHO *et al.*, 2012). Fizeram surgir diversos estudos no âmbito da modelagem hidrológica, a qual, aplicada ao gerenciamento hídrico, torna-se uma importante ferramenta de análise e representação simplificada do ciclo hidrológico (FAN; RAMOS; COLLISCHONN, 2015; ALMEIDA; SERRA, 2016).

Dentro desse contexto, pesquisas demonstraram modelos hidrológicos auxiliando em estudos ambientais, o qual tem ajudado a entender os impactos das mudanças no uso do solo e projeções de alterações futuras no ecossistema, como o caso dos Modelos Hidrológicos de Grandes Bacias (MGB-IPH) (PONTES *et al.*, 2015), o Stanford, o Soil Conservation Service (SCS) (CORREIA; RIBEIRO; BAPTISTA, 2015), o Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation (SSAR) (AHN *et al.*, 2014), o TOPMODEL (METCALFE *et al.*, 2015), o Système Hydrologique Européen (SHE) (DERAEDT *et al.*, 2014), o Institute of Hydrology Distributed Model (IDHM) (NIU; KNOULFT, 2016) e o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998).

Neste estudo utilizou-se o modelo hidrológico SWAT, devido sua flexibilidade, e por ser uma excelente ferramenta para o fornecimento de subsídios aos órgãos de gestão territorial e de recursos hídricos (GASSMAN; SADEGHI; SRINIVASAN, 2014), além de suas aplicações serem voltadas para o monitoramento de vazões, projeções de enchentes, qualidade da água, processos erosivos, entre outros. Ele foi originado de diversas correções e aperfeiçoamento do simulador de recursos hídricos em bacias rurais (SWRRB – Simulator for Water Resources in Rural Basins), desenvolvido pela USDA nos anos 80, com intuito de gerir os impactos na água e o

movimento de sedimentos em bacia rurais sem monitoramento, nos Estados Unidos (ANDRADE, 2013).

Desde a sua criação a ferramenta tem passado por inspeções contínuas e expansão da sua capacidade, entre elas são: SWAT 94.2 (incorporação das unidades de respostas múltiplas – HRUs); SWAT 96.2 (autofertilização e irrigação); SWAT 98.1 (aprimoramento da qualidade do fluxo de água); SWAT 99.2 (melhoria nas rotinas do ciclo de nutrientes); SWAT 2000 (transporte de bactérias); entre outros. Além dessas mudanças, também foram desenvolvidas interfaces do modelo com os programas Windows (visual basic), GRASS, ArcGis e atualmente o QGis, bem como extensivo processo de validação (NEISTCH *et al.*, 2011).

O modelo é reconhecido internacionalmente como uma robusta e interdisciplinar ferramenta de modelagem hidrológica, o que é evidenciado pelas conferências internacionais sobre o SWAT (Brasil/2014; Itália/2015; China/2016; Malásia/2017), e publicações relacionadas ao modelo, apresentadas em diversos encontros e revistas científicas (WANG *et al.*, 2010; DE ALMEIDA BRESSIANI *et al.*, 2015; DILE *et al.*, 2016). O modelo tem sido amplamente difundido graças aos avanços na tecnologia, o qual tem comprovado ser uma ferramenta flexível que pode ser aplicada para simular diversos problemas em uma bacia hidrográfica (KUWAJIMA *et al.*, 2011).

Como por exemplo, no estudo de Wang *et al.* (2010) que examinaram os efeitos interativos do uso e do tipo do solo, sobre a vazão de água e os teores de sedimentos, na bacia hidrográfica de Cowhouse Creek, localizada no norte do Texas, com o objetivo de desenvolver melhores práticas de manejo do solo, auxiliando na saúde da população, bem como, na sustentabilidade da bacia, relacionados aos efeitos do uso da terra.

Já no Brasil, por apresentar proporções continentais, permite uma grande variabilidade climática, entre as diferentes regiões, assim como a ocorrência de diferentes biomas, logo há uma maior necessidade de ferramentas no auxílio à tomada de decisões, no que se refere ao manejo dos recursos naturais (DE ALMEIDA BRESSIANI *et al.*, 2015). Recentemente, Blainski; Acosta; Nogueira (2017) mostrou a eficácia do modelo SWAT na representação do fluxo hidrossedimentológico em uma bacia hidrográfica (rio Camboriú), localizada em Santa Catarina, a partir da calibração e validação do modelo, com o intuito de comprovar a eficiência do SWAT na simulação das curvas de permanência das diversas variáveis estudadas, demonstrando o uso do modelo como uma ferramenta importante na gestão de bacias hidrográficas.

Tendo em vista a importância de obtenção de informações sobre a dinâmica de uma bacia, no seu gerenciamento e monitoramento, optou-se por aplicar a modelagem hidrológica, na bacia do rio Apeú, que apresenta um constante crescimento populacional, provocando mudanças no uso e cobertura do solo. Ainda ao se tratar de uma área com diversas nascentes contribuintes ao rio Guamá, sendo necessário um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

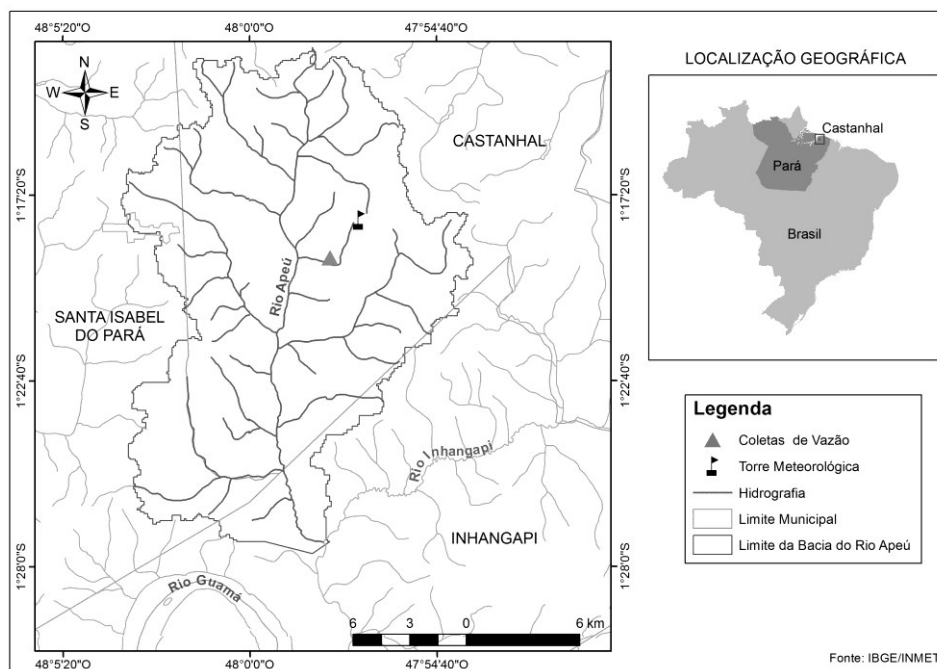
Assim, este artigo tem como objetivo testar a aplicabilidade do modelo SWAT como ferramenta complementar no gerenciamento de recursos hídricos, usando como exemplo a bacia hidrográfica do Rio Apeú, mostrando que é possível a utilização do modelo na obtenção de informações sobre a dinâmica de uma bacia, e com isso, representando o regime hidrológico, a partir das variáveis climáticas, tipo e uso do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Apeú, faz parte do conjunto de sub-bacias do Rio Guamá, localizada no nordeste do estado do Pará, na mesorregião metropolitana de Belém. A Sub-bacia se estende entre as coordenadas, 1°13'10" e 1°27'37" de latitude Sul e 48°04'42" e 47°53'30" de longitude Oeste, com área de aproximadamente 307 km², pertencentes aos Municípios de Castanhal, Santa Izabel do Pará e Inhangapi (Figura 1).

Figura 1- Localização do rio Apeú, Pará, Brasil.



Fonte: Autor.

O Clima regional é do tipo Ami, de acordo com a classificação de Koppen, as temperaturas máximas e mínimas são 35° e 18° C, respectivamente, com temperatura média anual de 26° C. A umidade relativa média e chuva anual são de 80% e 2.571,6 mm, respectivamente (TENÓRIO *et al.*, 1999; FARIAS, 2017).

2.2 Obtenções dos Dados

O tipo do solo foi extraído a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala de 1:250.000, aonde foram encontrada duas classes de solos, distribuídos da seguinte forma: 92% Latossolo Amarelo e 8% Gleissolo Háptico. Com relação ao uso do solo da bacia em estudo, o mapa foi elaborado com base no projeto TerraClass, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a partir de imagens de Satélites LANDSAT-5, com resolução espacial de 30 m, em que neste estudo utilizou a órbita/ponto 223/061, gerando sete classes (agricultura anual, pasto, área urbana, floresta, vegetação secundária, mineração e hidrologia), as quais foram reclassificadas com base no banco de dados do modelo Hidrológico SWAT em: As Áreas Antrópicas Agrícolas recobrem 41% da área. As Áreas Urbanas recobrem 12%. As Pastagens recobrem 11%, A Floresta Mista recobre 35%, A Mineração e os corpos hídricos ocupam menos de 1% da área.

O MNT da sub-bacia foi obtido gratuitamente do site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a partir de imagens SRTM, com resolução espacial de 90 m. Posteriormente foi transformada em imagens raster, de resolução espacial de 30 m, na escala de 1:250.000, assim como as informações de tipo e uso do solo envolvidos neste estudo, pois elas devem possuir a mesma resolução espacial e mesma escala para serem adicionadas no modelo.

Os dados climáticos utilizados foram de temperatura máxima e mínima (Tmax e Tmin), velocidade e direção do vento (VV e DV), umidade relativa (UR), radiação solar (RS), ponto de orvalho (PO) e precipitação (PRP), no período de 2009 a 2017, obtidos de uma torre meteorológica, do Instituto nacional de meteorologia (INMET) localizado no município de Castanhal/PA.

As medições de vazões foram realizadas através do método convencional, com a utilização do molinete hidrométrico, para a determinação da área e da velocidade média do fluxo que passa pela seção transversal do ponto monitorado (MALDONADO; WENDLAND; PORTO, 2015). De acordo com a medição a vau (Medição realizada por um observador que atravessa o curso de água a pé medindo profundidades e velocidades, indicados para rios de pequena largura e pouca profundidade (CARVALHO, 2008)), dividiu-se em três seções (0,5m, 1m e 1,5m), ao longo do comprimento total (2,20m) da seção transversal do tributário do rio Apeú (localizado na sub-bacia 5), em nível d'água de 0,14, 0,14 e 0,11m (60% de profundidade), durante 30 dias (de novembro a dezembro), conforme resolução da ISO 748 (ISO, 2007).

O cálculo do número de rotação por segundo no molinete, se dar pela divisão entre número de rotações registradas e o intervalo de tempo de medição da velocidade. Posteriormente este valor é convertido em velocidade através da equação do molinete, a qual é calibrada para cada molinete de forma individual, neste estudo foi usado o molinete JCTM, de modelo MLN-7 (Equação 1):

$$V=axN+b \quad (1)$$

Onde:

V = Velocidade;

a = Passo da hélice;

b = Inércia da hélice;

N= Número de rotação por segundo.

A vazão foi calculada pelo método da meia seção, que consiste no cálculo das vazões parciais, por meio da multiplicação da velocidade média na vertical pelo produto da profundidade média na vertical e pela soma das semidistâncias às verticais adjacentes (vazão parcial determinada para cada região de influência de uma determinada vertical) (ANA, 2016) (Equação 2) e a vazão total (Equação 3):

$$q_i = v_i h_i \left(\frac{d_{i+1} + d_{i-1}}{2} \right) \quad (2)$$

Onde:

q_i = Vazão na seção i (m³/s);

v_i = Velocidade média na vertical i (m/s);

h_i = Profundidade da vertical i (m);

d_{i+1} = Distância a partir do PI até a vertical posterior (m);

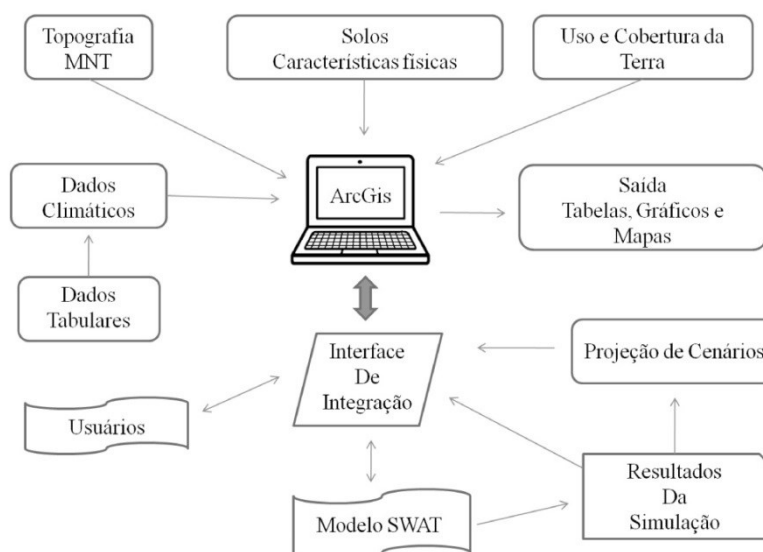
d_{i-1} = Distância a partir do PI até a vertical anterior (m).

$$Q = \sum_i^n q_i \quad (3)$$

2.3 Processamentos dos dados: Modelo SWAT

O SWAT avalia o efeito do uso do solo no escoamento, no transporte de sedimento e na qualidade da água em bacias hidrográficas (ARNOLD *et al.*, 2012; BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2015). O seu funcionamento ocorre basicamente pelas entradas de dados na interface SIG (Sistema de Informação Geográfica), organizados em dados geocartográficos e tabulares, os quais correspondem aos mapas de uso e cobertura do solo, mapas pedológicos, hidrografia e modelo numérico de terreno (MNT) e dados climáticos (velocidade do vento, precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar) respectivamente. Nesse estudo foi utilizado o SWAT, na versão 2012 (Figura 2).

Figura 2- Processo de funcionamento do modelo SWAT.



Fonte: Adaptado de SOUSA, 2010.

A simulação hidrológica realizada pelo modelo é dividida em duas fases. A primeira consiste na fase terrestre do ciclo hidrológico, a qual controla a quantidade de água e sedimentos para o canal principal de cada sub-bacia. Enquanto que a segunda é a fase de propagação de canal (vazão), representando o balanço hídrico, conforme a equação 4 (NEITSCH *et al.*, 2011). O balanço hídrico é a força motriz que impulsiona a execução de todos os processos no modelo SWAT (FERRIGO *et al.*, 2014). Ele incorpora oito componentes principais para prover suas simulações (ARNOLD, 1998), são eles: a - Hidrologia (escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem). Incluindo ainda a análise em reservatórios; b - Aporte sedimentos; c - Clima; d - Crescimento vegetal; e - Nutrientes (investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e fósforo) e; f - Pesticidas e bactérias.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - Et_i - P_i - QR_i) \quad (4)$$

Onde:

SW_t = É a quantidade final de água no solo (mm);
 SW_0 = É a quantidade inicial de água no solo (mm);
 t = É o tempo (dias);
 R_i = É a precipitação (PRP) (mm);
 Q_i = É o escoamento superficial (mm);
 Et_i = É a evapotranspiração (mm);
 P_i = É a percolação (mm); e,

QR_i = É o fluxo de retorno (é o escoamento de água no interfluxo, sobre a superfície do terreno, após emergir da superfície, ocorrida através da ascensão capilar) (mm).

O modelo SWAT divide a bacia em sub-bacias com base no relevo, tipo e uso do solo, preservando assim os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da bacia. Essas sub-bacias são divididas em HRUs, que representam combinações únicas de uso e tipo do solo e classe de declividade. As HRUs não interagem entre si. As respostas de cada HRU (escoamento, sedimentos e nutrientes) são calculadas separadamente e então somadas para encontrar-se a carga total da sub-bacia (PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013).

2.4 SWAT-CUP

O programa integra cinco procedimentos de calibração e análise de incertezas semiautomáticas: SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol e MCMC, para a interface do modelo SWAT (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2015), para este estudo foi aplicado o método SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*), o qual utiliza o método do hipercubo latino para definição dos parâmetros, a calibração com o SUFI-2 é realizada através de sucessivas iterações, com o mesmo número de simulações cada. A cada iteração o intervalo de valores dos parâmetros calibrados é reduzido, sempre centralizado no conjunto que obteve o melhor valor para a função objetivo (FRANCO; OLIVEIRA; BONUMÁ, 2017).

No SUFI-2 as incertezas das estimativas são comunicadas através de dois indicadores estatísticos: o fator-p e o fator-r. O fator-p indica a porcentagem de dados observados que é englobada pelo resultado de simulações ao final da iteração. O fator-p varia de 0 a 1, onde 1 corresponde a 100% dos dados observados. O fator-r indica a espessura do resultado de simulações, isto é, a incerteza da iteração. Um modelo está calibrado quando se atinge um equilíbrio entre ambos os fatores, englobando parcela razoável dos dados observados, com um nível de incertezas aceitável (FRANCO; OLIVEIRA; BONUMÁ, 2017). Valores acima de 0,70 para o fator-p e abaixo de 1,50 para o fator-r indicam uma calibração aceitável de vazão (ABBASPOUR, 2015).

Quinze parâmetros foram escolhidos para calibração, para determinar quais variáveis são mais influentes e importantes para o escoamento superficial. Foram efetuadas 2 iterações, padronizadas com 500 simulações cada (ABBASPOUR, 2015), até a obtenção de um intervalo (valores mínimos e máximos) adequado às condições da

bacia. Os parâmetros do modelo obtidos na calibração, a descrição e sua faixa de variação admitida no programa SWAT-CUP encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT e suas respectivas faixas de variação.

Parâmetro	Descrição	Faixa de variação
CN2	Coeficiente de rugosidade do canal principal (m-1/3 s).	35 a 98
ALPHA_BF	Fator do fluxo de base (dia).	0 a 1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	0 a 500
REVAPMN	Percolação para o aquífero profundo	0 a 500
DEEPST	Profundidade inicial de água no aquífero profundo (mm H ₂ O)	0 a 50000
GWQMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	0 a 5000
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo (mmH ₂ O mmsolo-1)	0 a 1
ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	0 a 1
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação	0.02 a 0.2
RCHRG_DP	Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	0 a 1
SURLAG	Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto	0.05 a 24
CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal principal	-0.01 a 0.3
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)	0 a 150
LAT_TTIME	Escoamento lateral (dias)	0 a 180
CANMX	Água interceptada (mm)	0 a 100

Fonte: Autor.

A simulação do modelo foi no período de 2009 a 2017. Para a etapa de calibração, foram comparados os valores de vazão simulados com os valores de vazões observados, para o período de três meses (de outubro a dezembro de 2017). Após a calibração foi realizada uma análise de sensibilidade global. O melhor desempenho do

modelo é obtido a partir dos valores observados e simulados, calculados com base nos seguintes métodos estatísticos: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS_{Ef}) (equação 5) (varia do $-\infty$ até 1), (NASH and SUTCLIFFE, 1970), e o coeficiente de determinação R^2 (varia de 0 a 1), sendo 1 o indicativo de simulação perfeita de evento simulado para ambos. Moriasi *et al.* (2007) apresentaram a seguinte classificação para o coeficiente NS_{Ef} em simulações diárias: quando, $0,75 < NS_{Ef} < 1,00$ o modelo é considerado muito bom; o modelo é considerado bom quando, $0,65 < NS_{Ef} < 0,75$; já entre 0,50 e 0,65 o NS_{Ef} é satisfatório; e abaixo de 0,50 é considerado inadequado.

Foi calculado também o erro do modelo, através da estatística PBIAS (%) (equação 6), que mede a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os dados observados, sendo o seu valor ideal próximo e/ou igual a 0. Valores positivos indicam que a simulação subestimou os valores observados, enquanto que valores negativos indicam uma superestimativa (DE OLIVEIRA BUENOS *et al.*, 2017). Van Liew *et al.* (2007) apresentaram a seguinte classificação para este coeficiente, em aplicações do modelo SWAT: quando o $|PBIAS| < 10\%$, é considerado “muito bom”; ele é considerado “bom”, quando o valor está entre, $10\% < |PBIAS| < 15\%$; já entre, $15\% < |PBIAS| < 25\%$ é considerado “satisfatório”; o modelo está inadequado quando, $|PBIAS| > 25\%$ (DE OLIVEIRA BUENOS *et al.*, 2017).

O modelo foi avaliado, através das equações:

$$NS_{Ef}=1-\frac{\sum_1^n(Q_o-Q_c)^2}{\sum_1^n(Q_o-Q_o)^2} \quad (5)$$

$$PBIAS=100\left[\frac{\sum_1^n(Q_o-Q_c)}{\sum_1^n Q_o}\right] \quad (6)$$

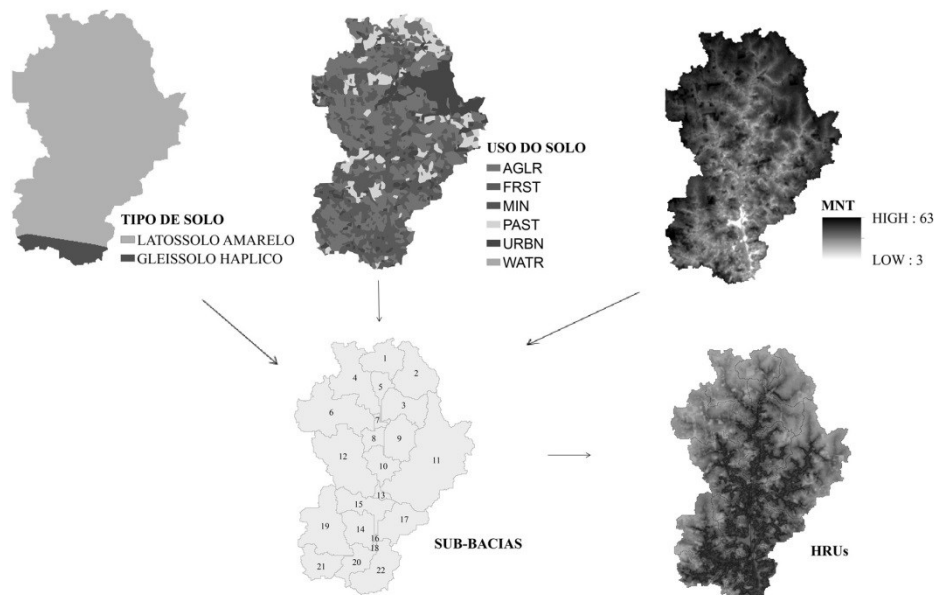
Onde, Q_o é a vazão observada, $\overline{Q_o}$ é a vazão média observada e Q_c é a vazão estimada, m^3s^{-1} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversas são as respostas que o modelo SWAT pode gerar para quem o utiliza como ferramenta de planejamento relacionado à gestão hídrica. Primeiramente ele é capaz de gerar diferentes unidades organizadas (usos da terra, tipo de solos com propriedades diferentes e declividade), permitindo entender e/ou analisar as diferentes frações de áreas distribuídas por toda a área da bacia. Neste estudo levou-se em consideração a URH dominante de cada sub-bacia, desconsiderando as classes que

apresentaram menores representatividades, como resultado o modelo delimitou a bacia do rio Apeú com uma área de aproximadamente 307,0 Km², subdividida em 22 sub-bacias, formando 22 HRUs (Figura 3).

Figura 3- Composição das unidades de resposta hidrológica (HRU) a partir dos mapas de tipo de solo, cobertura vegetal e topografia.



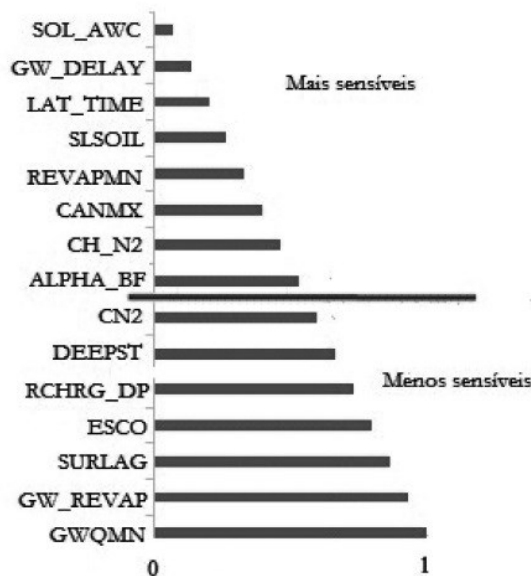
Fonte: Adaptado de EASTON *et al.* (2008).

O processo de calibração e avaliação de eficiência do modelo, realizada no SWAT-CUP, identificou um fator-p de valor 0.8 e um fator-r, de 0.9, mostrando que há um equilíbrio entre os fatores, e, portanto, demonstra uma calibração “aceitável”. Dentre os quinze parâmetros físicos escolhidos, durante a etapa de calibração, os que apresentaram maior sensibilidade possuem o seu valor de P próximo à zero, determinando a significância da sensibilidade (ABBASPOUR, 2014). Sendo que, nesse estudo o parâmetro que possui maior influência na modelagem da vazão, é SOL_AWC, que está associado à capacidade de água disponível no solo, ou seja, indicando que existe pouca contribuição de água subterrânea neste perímetro do rio, o que é compatível com as condições pedológicas da sub-bacia (5), predominantemente do tipo Latossolo amarelo, caracterizado por solos secos e duros (IBGE, 2015).

O segundo parâmetro foi o GW_DELAY, associado ao intervalo de tempo para recarga do aquífero, indicando o tempo de atraso das águas subterrâneas, tornando este, um dos parâmetros que tem mais impactos sobre a variável vazão (Figura 4). Este tipo de análises mostra que para se obter um melhor resultado é necessário que os

parâmetros sejam analisados e calibrados, conforme a saída desejada do modelo (vazão, sedimento, nutrientes, e etc.) e as características da bacia em estudo.

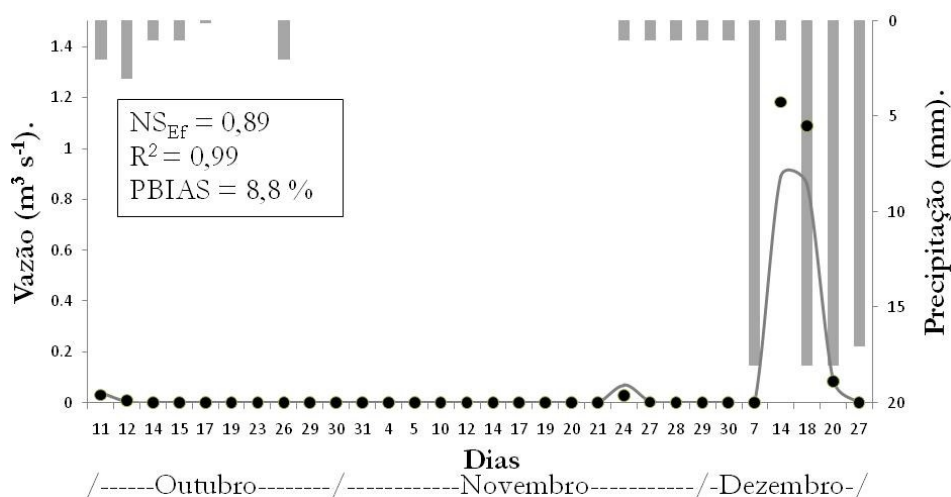
Figura 4- Ranking dos parâmetros obtido com a análise de sensibilidade.



Fonte: Adaptado de Castro (2016).

Durante a calibração, o modelo apresentou uma boa eficiência ($NS_{Ef} = 0,89$) na simulação da vazão, decorrente da alta correlação entre os valores simulados e observados ($R^2 = 0,99$) e dos baixos erros ($PBIAS = 8,8\%$) durante as simulações (Figura 5). Este resultado demonstra que o SWAT pode auxiliar na simulação da vazão na bacia do rio Apeú, pois diversos estudos para bacias de mesmo porte apresentaram resultados parecidos. Como no estudo de Silva e Christofaro (2017), que demonstraram valores de NS_{Ef} e R^2 , de 0,53 e 0,62, respectivamente na calibração do rio Jequitinhonha, no estado de Minas Gerais. E no estudo de Ferreira e Uagoda (2016) que encontraram para os resultados diários, durante a etapa de calibração, os valores de NS_{Ef} igual a 0,53 e uma correlação (R^2) de 0,63 entre os valores de vazão simulada e observada na bacia hidrográfica de Ribeirão do Gama, no Distrito Federal. Assim, os modelos hidrológicos podem ser úteis para uma gestão eficiente de recursos hídricos, principalmente em bacias hidrográficas de pequeno porte ou em regiões onde se tenham conflitos pelo uso da água (BLAINSKI *et al.*, 2017).

Figura 5- Comparação entre a vazão simulada (linha) e a vazão observada (circulo), no período de calibração (outubro a dezembro de 2017) do modelo SWAT e a precipitação (coluna) observada no período.



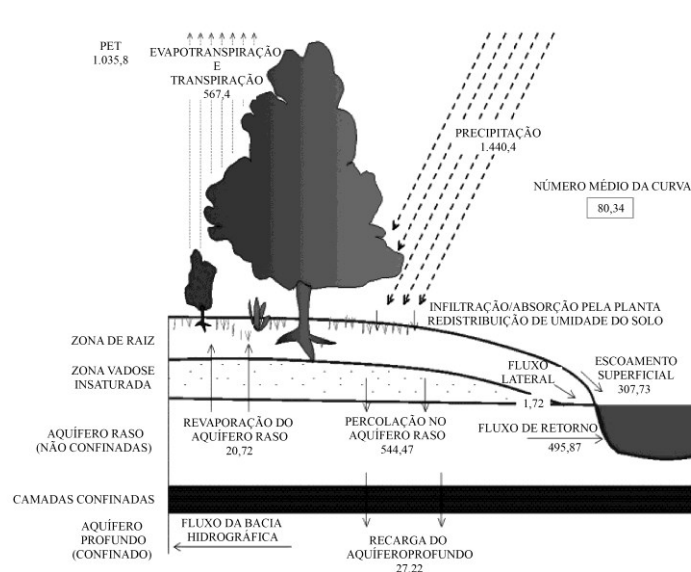
Fonte: Autor.

Outra resposta do modelo, que pode ser aplicada na gestão dos recursos hídricos, é a simulação do balanço hídrico, que se constitui em uma determinação da variação hídrica local, sem que haja a necessidade de medidas diretas das condições do solo (PEREIRA, 2005; FENNER *et al.*, 2014). Essa informação permite conhecer a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, se há uma deficiência ou excedente hídrico, bem como o armazenamento de água no solo, e ainda permite a estimativa da evapotranspiração local (FENNER *et al.*, 2014).

Esse conhecimento colocaria em evidência a importância das áreas de preservação permanente (APP), que a lei de n. 12.695 de 2012 dispõe, destacando a proteção das áreas no entorno dos rios, evitando modificações do uso do solo de forma impactante, que venha influenciar no aumento do escoamento superficial da água e com isso trazer sérios problemas, como, erosão, enchentes, contaminação, e entre outros.

A precipitação anual média (2009 a 2017) para a bacia do rio Apeú foi de 1449,05 mm, deste valor, 583,7 mm (40 % do total de precipitação) retornam por evapotranspiração, ligados aos diversos tipos de uso do solo. Do total de chuva, cerca de 328,78 mm (\cong 21 %) escoam superficialmente, 38 % percolam (529,48 mm) e apenas 1 % revapora (20,72 mm). Dos 529,48 mm que percolaram, 1,72 mm (\cong 2%) escoam lateralmente, \cong 6 % (26,47 mm) vão para o aquífero profundo e 482,15 mm (92 %) retornam a bacia (Figura 6).

Figura 6- Ciclo hidrológico anual simulado pelo modelo SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Apeú.



Fonte: Adaptado do modelo SWAT.

De acordo com o modelo, a bacia do rio Apeú, mostrou que do total de chuva (1449,05 mm), 38% é percolado (529,48 mm) se convertendo em escoamento e contribuindo com a vazão do rio, com isso, pode-se afirmar que durante esses nove anos 6% do volume percolado se destinaram ao aquífero profundo, sendo capaz de colaborar com o aquífero Barreiras.

O SWAT ainda permite, uma análise de cenários que ele simula em função do uso e mudança do solo, demonstrando a influencia dessas alterações sobre o regime hidrológico, com isso é possível com base nos dados de precipitação, visualizar e preencher falhas em vazões, para um controle de cheias, importante para projetos de hidráulicas (DE FREITAS PEREIRA *et al.*, 2016), bem como evitar erosões, comprometimentos na qualidade da água, etc. Onde percebe-se que as técnicas de modelagem aplicada aos estudos hidrológicos são uma forma prática, rápida e barata de se simular cenários futuros dos recursos naturais, possibilitando a proposição de soluções para contornar alguma situação subsequente indesejada (BONUMÁ *et al.*, 2015).

4 CONCLUSÃO

O modelo SWAT aplicado à bacia do rio Apeú, mesmo com dados limitados para inserção ao modelo, demonstrou que foi possível delinear a sua área e simular os componentes do balanço hídrico, e em especial a vazão. O uso do modelo SWAT tem se intensificado em estudos de rios brasileiros, em detrimento da quantidade de afluentes

existentes sem o monitoramento, devido às dificuldades de acesso a esses rios e pela falta de interesses em aplicar recursos voltados ao seu monitoramento, os quais tem sido muitos evidenciados pelas intensidades de chuvas e prejuízos na região.

Ainda o uso do modelo pode auxiliar no planejamento dos recursos hídricos, uma vez que, o seu uso pode antecipar situações que podem ser prejudiciais á gestão desses recursos, decorrente dos diversos usos do solo existente na bacia, bem como no gerenciamento da água pelo uso da agricultura, atividade que utiliza bastantes recursos e demanda hídrica.

Contudo, o modelo SWAT também pode ser aplicado em estudos futuros na bacia do rio Apeú, como por exemplo, aos estudos voltados à quantidade do rendimento de água, desde a nascente até seu exutório, com o intuito de entender o quanto as sub-bacias estão contribuindo para o rio principal, e com isso, poder auxiliar no planejamento da quantidade e qualidade da água que chega às comunidades, auxiliando na manutenção dos recursos e melhor uso da água pelos diferentes usos existentes ao longo da bacia. Diante disso, essa pesquisa propõe o quanto o uso do modelo SWAT pode contribuir com o planejamento e nas tomadas de decisão nas bacias.

CAPÍTULO 3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NA BACIA DO RIO APEÚ ATRAVÉS DO MODELO SWAT²

RESUMO

A disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica depende da variabilidade temporal e espacial expressa por várias funções hidrológicas, as quais são influenciadas pelo clima, fisiografia e uso de solo. Este artigo se propôs avaliar espacialmente a distribuição de água na bacia do rio Apeú, através da simulação da produção de água (WYLD) gerada pelo modelo SWAT, durante o período de 2007 a agosto de 2018. Para isso, utilizou-se o modelo SWAT na simulação de diversas informações que compõem o balanço hídrico, em especial a produção de água, a partir de informações de uso e tipo de solo, declividade e dados climáticos obtidos de órgão como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como, características morfométricas calculadas a partir do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os resultados demonstraram que a WYLD está intimamente ligada com a dinâmica dos usos e ocupações do solo e a morfometria da bacia do rio Apeú, ao longo dos anos analisados, e não somente a sazonalidade das precipitações na região. Ainda, em decorrência das mudanças sofridas pela bacia ocasionaram um aumento em cerca de 30 % das perdas de água e diminuíram em até 60 % a sua produção o que pode ser prejudicial à população que dependem da bacia, para a pesca, transporte, entre outros.

Palavras chave: Modelagem hidrológica, Disponibilidade hídrica e SIG.

ABSTRACT

The water availability of a river basin depends on the temporal and spatial variability expressed by several hydrological functions, which are influenced by climate, physiography and soil use. This paper proposes to spatially evaluate the water distribution in the Apeú river basin, through the simulation of water production (WYLD) generated by the SWAT model, during the period from 2007 to August 2018. For this purpose, the SWAT model for the simulation of diverse information that

² Artigo publicado em Maio/2019 na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Qualis B1, em Ciências Ambientais.

compose the water balance, especially the water production, from information of use and type of soil, slope and climatic data obtained from organ such as IBGE, INPE and INMET, as well as calculated morphometric characteristics from the Geographic Information System. The results showed that WYLD is closely linked to the dynamics of soil uses and occupations and morphometry of the Apeú river basin over the years analyzed, not only the seasonality of rainfall in the region. Still, these results showed that as a result of these changes suffered by the basin caused an increase in about 30% of the water losses and reduced their production by up to 60%, which may be detrimental to the population that depend on the basin.

Key words: Hydrological modeling, Water availability and GIS.

1 INTRODUÇÃO

A água é indispensável à manutenção da vida em todo o planeta, isso a torna insubstituível para todas as atividades humanas. Já os impactos causados pelo homem ao ambiente natural vêm ao longo dos anos, dificultando a sua utilização de forma sustentável, e conseqüentemente diminuindo sua disponibilidade (OLIVEIRA; NUNES, 2015). Apesar de sua importância, as formas de obter informações sobre o ciclo hidrológico ainda são bastante limitadas, principalmente em escalas de bacias, tornando difíceis as obtenções de informações que auxiliem no entendimento dos principais componentes do balanço hidrológico, como a evaporação, a condensação e os escoamentos (BARRY; CHORLEY, 2013).

Todos estes processos além de auxiliar no entendimento deste balanço em uma bacia hidrográfica, também ajudam a identificar as condições de excedente ou de deficiência de água (ABREU; TONELLO, 2015), contudo, elas sofrem alterações significativas em decorrência de atividades antrópicas, como as modificações na ocupação da terra, o desmatamento, a expansão da agropecuária e a urbanização (COUTINHO *et al.*, 2013).

Santos *et al.* (2007), Doriguel, Campos e Delmanto Junior (2015) acreditam que para avaliar o possível efeito de qualquer perturbação numa bacia hidrográfica, é necessário conhecer, inicialmente, as características do ecossistema em suas condições naturais de equilíbrio, a fim de estabelecer comparações entre as condições hidrológicas

e de qualidade da água no ecossistema natural e os ecossistemas nos quais ocorre ação direta do homem.

Para Usace (2010), Correia, Ribeiro e Baptista (2015), as técnicas avançadas de modelagem hidrológica tornaram-se viáveis, porque agora a geração e manipulação de dados podem ser feitas com eficiência por meio de operações espaciais em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), não só economizando tempo e esforço, como também, melhorando a precisão em relação aos métodos tradicionais.

Desta forma, um modelo hidrológico pode estimar as dinâmicas hidrológicas, através de equações que caracterizam o comportamento hidrológico de uma bacia (ALMEIDA; SERRA, 2017). Eles possuem diversas tipologias, podendo também se distinguir conforme o objetivo da simulação (MORIASI *et al.*, 2015). Entre os atuais modelos existentes, se destaca o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998; ARNOLD; FOHRER, 2005; GASSMAN *et al.*, 2007), que tem sido amplamente utilizado em estudos de bacias no Brasil (DE ALMEIDA BRESSIANI *et al.*, 2015; BLAINSKI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018) e também, devido a sua flexibilidade e aplicações voltadas para o monitoramento de vazões, projeções de enchentes, qualidade da água, processos erosivos e entre outros (TESHAGER, 2016).

O modelo SWAT permite simular a produção de água em bacias hidrográficas, em nível da própria bacia, sub-bacia ou unidades de respostas, onde a quantidade de água produzida é igual à soma entre, a contribuição do escoamento superficial, do escoamento lateral, do escoamento subterrâneo, menos as perdas de transmissão em canais tributários ou por percolação na sub-bacia. Ela pode ser definida como a quantidade de água que efetivamente contribui para a vazão no canal durante um intervalo de tempo (ARNOLD *et al.*, 2012).

O artigo se concentrou em avaliar espacialmente a distribuição de água na bacia do rio Apeú, através da simulação da produção de água (WYLD) gerada pelo modelo SWAT, durante o período de janeiro 2007 a agosto de 2018. E com isso verificar neste período, os acontecimentos positivos e negativos provocados pela ocupação inadequada de encostas e margens dos afluentes e como isso pode está implicando na vida útil da bacia, bem como, se há condições favoráveis para que a população possa usufruir de forma saudável e preservando as nascentes.

O uso da modelagem aplicado aos processos que envolvem a relação precipitação – vazão em uma bacia hidrográfica nos pressupõe o conhecimento de todos

os componentes (precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, percolação, armazenamento da água no solo e superfície) que atuam no ciclo hidrológico, sendo responsáveis pelos deflúvios da bacia, o qual é influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia e uso de solo. Ainda, o clima pode afetar tanto a distribuição espacial e temporal das variáveis hidrológicas (chuva e vazão), quanto à intensidade e frequência de eventos extremos. Enquanto que o uso do solo e a fisiografia influenciam diretamente na velocidade de escoamento da água em direção ao rio principal, alterando a quantidade de água escoada (ADAM *et al.*, 2015).

A principal entrada da água na sub-bacia é através da precipitação, devido ao fato desta controlar o balanço de água, se tornando de suma importância que a quantidade e a distribuição no tempo e no espaço sejam simuladas com exatidão no modelo, já que todos os outros processos iram depender dela, como o tempo de concentração, em que a partir do início de uma chuva (evento pluviométrico) até que a área inteira da sub-bacia esteja contribuindo para o fluxo na saída (NEITSCH; KINIRY; WILLIAMS, 2009).

1.1 Estudo hidrológico e a sua importância na distribuição de água na vila Apeú

As bacias hidrográficas possuem uma área de captação natural da água (precipitação) que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Então pode ser considerado um ente sistêmico. É onde acontecem os balanços de água, pela entrada proveniente da chuva e de saída através do exutório, permitindo que sejam delineadas bacias e sub-bacias, cujas interconexões se dão pelos sistemas hídricos (PORTO, 2008; DORIGUEL; CAMPOS; DELMANTO JUNIOR, 2015).

Tucci (2009) considera a hidrologia como sendo uma ciência interdisciplinar em evolução diante dos crescentes problemas, devido à ocupação das bacias, da demanda pela utilização da água e o impacto sobre o meio ambiente, que passou de uma ciência preponderantemente descritiva e qualitativa, para uma área do conhecimento na qual os métodos quantitativos são explorados por meio de modelos matemáticos e estatísticos, melhorando os resultados e a previsão de ocorrência de inundações (CORREIA; RIBEIRO; BAPTISTA, 2015).

Marinho Filho *et al.* (2012) compreendem que os processos hidrológicos são fundamentais para estudos dos recursos hídricos, em que o tempo que a água permanece nas diversas partes da hidrosfera influencia, entre outros, a disponibilidade hídrica, a ocorrência de inundações e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes.

De acordo com Rodrigues e Batistela (2013) a água é uma fonte natural classificada como renovável finita e aleatória, sendo essencial para vida humana. Por sua capacidade de se recompor rapidamente, em quantidade, principalmente pelas chuvas, ela é renovável, mas é considerado um recurso finito, pois pode ser comprometida facilmente pela poluição, tornando-se inadequada para o uso humano. É de ocorrência aleatória, pois sua distribuição é irregular no tempo e por região, sendo influenciada pelas condições climáticas e meteorológicas.

Sabendo que a água é um recurso essencial para a vida humana e com a possibilidade de sua escassez, a Lei de Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n.9433/97) considerou a água um bem econômico que abrange diferentes fontes para sua utilização. Essas fontes, denominadas de Recursos Hídricos, são compostas por águas superficiais (rios, lagos, lagoas e bacias e mar territorial) e subterrâneas (BARROS; BARROS, 2009; RODRIGUES; BATISTELA, 2013).

O rio Apeú possui um comprimento de aproximadamente de 27,87 km, e na sua extensão estão os municípios de Castanhal, Santa Izabel do Pará e Inhangapi, possuindo como principais afluentes, os igarapés Macapazinho, Castanhal, Americano, Quatro, Praquiquara, Apeteua, Janjão, Fonte Boa, Marapanim, Taiteua, Papuquara, Capiroanga, Itaqui e São João. Ao longo de sua influência encontram-se diversas localidades (vilarejos, povoados, fazendas, etc.), sendo a maior concentração na porção norte e central da bacia. Possui características de atividades rurais e urbanas, apresentando diversos usos no seu território, dentre estes se destacam: a agricultura, a pecuária e a extração mineral. Atualmente, a expansão da urbanização com os loteamentos residenciais tem contribuído com os demais usos no processo de transformação da paisagem (VALE; BORDALO; FONSECA, 2015).

Mantê-la é de suma importância para a boa qualidade de vida dos seres vivos, ela possui funções ambientais importantes tanto para a natureza quanto para a população que dependem dela, seja para subsistência ou lazer (PANIZZA, 2016). Contudo a crescente demanda por água para usos domésticos, industriais e agrícolas, os cursos fluviais tem sofrido agressões e por conta disso poucos ainda mantêm suas condições naturais preservadas (VARGAS; FERREIRA JÚNIOR, 2012).

Montaño e Souza (2016) descrevem a disponibilidade hídrica, tanto em termos de quantidade quanto em termos de qualidade e tempo de recorrência, um fator relevante ao desenvolvimento econômico e social de uma bacia hidrográfica, existe a

necessidade de se voltar à atenção do planejamento para a sustentabilidade dos recursos hídricos, atuando principalmente de forma preventiva sobre a gestão da demanda.

A definição adotada para a disponibilidade hídrica foi dada por Cruz e Tucci (2008) que a define como a parcela de vazão que pode ser utilizada pela sociedade para o seu desenvolvimento, sem comprometer o meio ambiente aquático. De outro lado a vazão resultante no rio após o uso da água é denominada aqui de vazão remanescente (“instreamflow”, segundo a literatura inglesa, Kramer, 1998). Esta vazão tem a finalidade de manter a integridade do sistema fluvial conservando o meio ambiente aquático.

Ainda segundo os autores a disponibilidade hídrica tem condicionantes de variabilidade no tempo e no espaço e não está limitada ao uso consultivo, mas também às alterações que pode produzir no hidrograma do rio em relação às condições pré-existentes. Estes condicionantes possuem restrições quantitativas e qualitativas estabelecidas tanto para atender os diferentes usos ao longo do tempo e do espaço, quanto para manter a integridade ambiental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia do Rio Apeú situa-se na mesorregião metropolitana de Belém, no estado do Pará. Ela possui seu exutório no rio Inhangapi, que juntos somam-se ao conjunto de sub-bacias que contribuem com rio Guamá, totalizando uma área de aproximadamente 307 km². O clima predominante na região é do tipo Am, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual em torno de 2571,6 mm. A distribuição de chuva na região é definida pelo período chuvoso, que vai de janeiro a abril e menos chuvoso que se estende de agosto a novembro. A temperatura média anual é de 26°C, com mínimas de 18°C e máximas de 35°C (SOUZA, 2017).

2.2 Dados Obtidos

Para aplicação do modelo SWAT, estruturou-se um banco de dados, contendo informações sobre o tipo e uso do solo, declividade e dados climáticos diários e hidrológicos. Os dados climáticos (Temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa e radiação solar) foram obtidos da estação

automática meteorológica, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Castanhal/PA, no período de 2007 a agosto de 2018, e a vazão através do método convencional, com a utilização do molinete hidrométrico, para a determinação da área e da velocidade média do fluxo que passa pela seção transversal do ponto monitorado (MALDONADO; WENDLAND; PORTO, 2015).

As medições de vazões foram realizadas em dois pontos de amostragem, P1 (no rio principal) e P2 (no afluente contribuidor), em que estes fluxos foram medidos em três seções (2 m, 4 m e 6 m), ao longo do comprimento total (7,50 m) da seção transversal do rio principal, em nível d'água de 40 m, 60 m e 80 m de profundidade e o P2 foi medido nas seções (0,5 m, 1 m e 1,5 m), ao longo do comprimento total (2,20 m) da seção transversal do tributário do rio Apeú, em nível d'água de 0,14, 0,14 e 0,11m (60% de profundidade), durante um ano (de outubro a dezembro de 2017 e janeiro a agosto de 2018), conforme resolução da ISO 748 (ISO, 2007), para maiores detalhes sobre a metodologia e os valores obtidos ver em Santos *et al.* (2018).

A informação base para definição das unidades espaciais no modelo SWAT é dada através do modelo numérico do terreno (MNT), que foi obtido do site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a partir de imagens SRTM, com resolução espacial de 90 m. Posteriormente foi transformada em imagens raster, de resolução espacial de 30 m, na escala de 1:250.000, assim como todas as imagens e informações utilizadas neste estudo.

O modelo ainda requer os mapas de tipos e uso do solo, onde as informações de uso do solo foram elaborados com base no projeto TerraClass desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (ALMEIDA *et al.*, 2016), a partir de imagens LANDSAT-5, na órbita/ponto 223/061, que foram organizadas de acordo com o banco de dados do SWAT, gerando seis classes, distribuídas em: Áreas antrópicas Agrícolas, Áreas Urbanas, Pastagens, Floresta Mista, Mineração e os corpos hídricos (Santos *et al.*, 2018).

Os tipos de solos foram obtidos a partir do banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo encontrados dois tipos: Latossolo amarelo e Gleissolo Háptico. Maiores detalhes sobre as informações e bancos de dados necessários para entrada no modelo se encontram em Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013).

2.3 Validação do Modelo

Os dados foram processados no software ArcGIS 10.3, através da extensão *ArcSWAT 2012* (versão 10_2.15) (WINCHELL *et al.*, 2013). A calibração do SWAT foi realizada através do programa *SWAT-CUP 2012* (versão 5.1.6.2), adotando o algoritmo de calibração *SUF12*. Detalhamentos sobre o desenvolvimento dos dados e os demais processos (calibração e análises estatísticas) podem ser vistos em Santos *et al.* (2018).

A simulação hidrológica foi desenvolvida, no período de 2007 a agosto de 2018, sendo comparados os valores de vazão simulados com os valores de vazões observados (etapa de calibração), para o período de outubro de 2017 a março de 2018, enquanto a etapa de validação ocorreu no período de janeiro a agosto de 2018. Para que coincidisse os pontos de medição da velocidade da água com os pontos de saída, a sub-bacia 9 e 10 foram utilizadas para a comparação da vazão simulada pelo modelo.

Para determinar quais as variáveis são mais sensíveis e importantes para o escoamento, foram analisados quinze parâmetros durante a calibração. Nesta etapa, foram realizadas 2 iterações, padronizadas com 500 simulações cada, até a obtenção de um intervalo (valores mínimos e máximos) adequado às condições da bacia (ABBASPOUR, 2015).

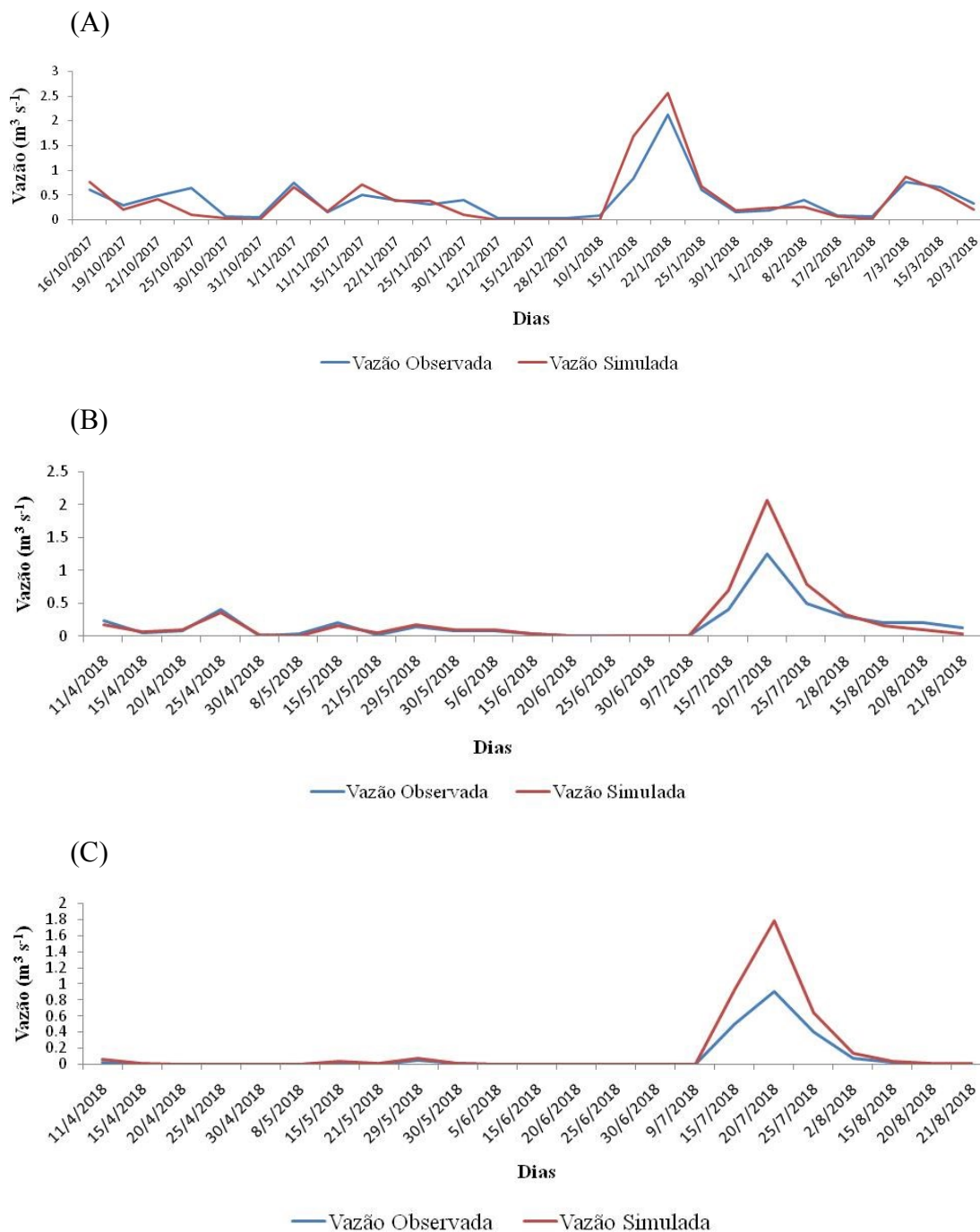
Os parâmetros mais sensíveis e que possuem maiores influências na modelagem da vazão, na bacia do Rio Apeú, durante esta etapa foram: Coeficiente de rugosidade do canal principal (CN2); fator do Fluxo de base (ALPHA_BF); intervalo de tempo para a recarga do aquífero (GW_DELAY); percolação para o aquífero profundo (REVAPMN); profundidade inicial de água no aquífero profundo (DEEPST); nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (GWQMN); Armazenamento de água no solo (SOL_AWC); Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo (ESCO); Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação (GW_REVAP); Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (RCHRG_DP); Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto (SURLAG); Coeficiente de Manning para o canal principal (CH_N2); Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (SLSOIL); escoamento lateral (LAT_TTIME) e água interceptada (CANMX).

O desempenho do modelo é obtido na comparação entre os valores observados e simulados, calculados com base nos seguintes métodos estatísticos: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS_{Ef}) (NASH and SUTCLIFFE, 1970) (que varia do $-\infty$

até 1), o coeficiente de determinação R^2 (que varia de 0 a 1), e o PBIAS (Erro Sistemático Bias) (%), que avalia a tendência média dos valores simulados serem maiores (subestimativa) ou menores (superestimativa) do que os observados, sendo o seu valor ideal próximo e/ou igual a 0 (DE OLIVEIRA BUENOS *et al.*, 2017).

O hidrograma da calibração (Figura 1A) e validação dos pontos 1 e 2 (Figura 1B e 1C respectivamente) responderam adequadamente a simulação realizada pelo modelo SWAT, obtendo valores mínimos e máximos das vazões diárias, apresentando resultados satisfatórios ($R^2 = 0,86$, $NS_{Ef} = 0,7$ e $PBIAS = 8,2$ %) no período de calibração e ($R^2 = 0,89$, $NS_{Ef} = 0,8$ e $PBIAS = 8,1$ %) para o ponto 1 e ($R^2 = 0,98$, $NS_{Ef} = 0,9$ e $PBIAS = 8,9$ %) para o ponto 2, no período de validação. Após os ajustes da validação, observou-se um padrão no comportamento dos picos e recessões do hidrograma, respeitando a sazonalidade do período analisado. Demonstrando que o modelo SWAT apresentou um bom desempenho.

Figura 1- (A) Vazão no período de calibração, (B) Vazão no período de validação do ponto 1 e (C) Vazão no período de validação do ponto 2.



Fonte: Autor.

Estes resultados (simulações) são processados pelo SWAT (sub-bacias) e agrupados em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), que neste estudo, possui uma única combinação do tipo e uso do solo e classes de declividades, preservando a homogeneidade e permitindo maior discretização do modelo na área simulada (NEITSCH *et al.*, 2002; GALHARTE; VILLELA; CRESTANA, 2013). Ainda, foi

usada a opção de uso dominante, assim foram geradas 23 sub-bacias, totalizando 23 unidades de respostas. Após estes processos e em conjunto com as simulações o modelo simula diversas variáveis que compõem o balanço hídrico através da equação:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (PRP - SURQ - Et - PERC - QR) \quad (1)$$

Onde: precipitação (PRP) (mm); evapotranspiração (Et) (mm); Escoamento superficial (SURQ) (mm); escoamento subterrâneo (GW_Q) (mm); quantidade de água no solo final e inicial (SW e SW₀, respectivamente) (mm); percolação (PERC) (mm), fluxo de retorno (QR) (mm) (é o escoamento de água no interfluxo, sobre a superfície do terreno, após emergir da superfície, ocorrida através da ascensão capilar), o tempo (t) (dias) e produção de água total da sub-bacia que alcança o canal (WYLD) (mm). Maiores informações sobre o funcionamento do modelo SWAT podem ser obtidos em Neitsch *et al.* (2011) e Abbaspour (2015).

2.4 Propagação do fluxo de água

Segundo Arnold *et al.* (2012), o sistema hidrológico simulado pelo SWAT compreende quatro principais componentes: os reservatórios superficiais, os reservatórios subsuperficiais, os reservatórios subterrâneos (aquíferos rasos ou livres) e os reservatórios subterrâneos (aquífero profundo). A contribuição desses reservatórios para o escoamento no canal provém do escoamento lateral a partir do perfil de solo e do escoamento de retorno do aquífero raso. O volume que percola do reservatório subsuperficial através do perfil de solo representa a recarga do aquífero raso, enquanto a água que percola para o aquífero profundo não retorna para o sistema.

Segundo Neitsch *et al.* (2005) o cálculo da vazão e da velocidade do escoamento nos rios é feito com a utilização da equação de Manning (Equações 1 e 2). Já a propagação da água nos rios utiliza o método de Williams (método de acumulação variada) ou Muskingum, os quais se baseiam no modelo da onda cinemática e na equação da continuidade.

Ainda segundo o autor, o modelo assume que os canais possuem formato trapezoidal com taludes cuja inclinação ocorre na proporção de 2:1 (horizontal: vertical), ou seja, igual a 0,5. O usuário pode informar ao modelo o comprimento, a largura e a profundidade do canal quando preenchido até o nível mais alto quando ainda

não ocorre inundação para fora do canal, assim como o coeficiente de Manning e a declividade do canal ao longo do seu comprimento. Quando o volume de água nos canais é maior do que o limite máximo que o canal suporta, a água empoça em volta do canal, inundando as margens. A área de inundação também apresenta formato trapezoidal, entretanto a inclinação dos taludes é menor.

Por meio dos cálculos de área seccional de vazão no canal e perímetro molhado, o modelo calcula o raio hidráulico do canal para uma dada profundidade. Essas variáveis são necessárias para definir a vazão e a velocidade no canal, conforme a equação de Manning (Equação 1 e Equação 2):

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (1)$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (2)$$

Onde: q_{ch} é a vazão no canal ($m^3 s^{-1}$); A_{ch} é a área seccional em que ocorre a vazão no canal (m^2); R_{ch} é o raio hidráulico do canal para uma determinada profundidade (m); slp_{ch} é a declividade ao longo do comprimento do canal ($m m^{-1}$); n é o coeficiente “n” de Manning para o canal; e v_c é a velocidade do fluxo no canal ($m s^{-1}$).

Enquanto que, o método de acumulação variada proposto por Williams (1969), é baseado na equação da continuidade, o qual é expresso à propagação de água pelo canal (Equação 3):

$$V_{out,2} = SC \cdot (V_{in} + V_{stored,1}) \quad (3)$$

Onde: $V_{out,2}$ é o volume de água que sai do trecho em questão (m^3); SC é o coeficiente de armazenamento; V_{in} é o volume que entra no período em questão (m^3); e $V_{stored,1}$ é o volume acumulado no início do período (m^3). O coeficiente de armazenamento é calculado pela equação 4:

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT \cdot \Delta t} \quad (4)$$

Onde: Δt é o período de tempo (s); e TT é o tempo de viagem.

Outro fator que vale ressaltar são as perdas por transmissão, em que, durante os períodos em que os canais não recebem contribuição de água subterrânea é possível que aconteçam perdas por transmissão no leito do rio. As perdas por transmissão são estimadas pela equação 5:

$$t_{loss} = K_{ch} \cdot TT \cdot P_{ch} \cdot L_{ch} \quad (5)$$

Onde: t_{loss} são as perdas por transmissão no canal (m^3H_2O), K_{ch} é a condutividade hidráulica do leito do rio (mm/h), TT é o tempo de viagem do fluxo (h), P_{ch} é o perímetro molhado (m), L_{ch} é o comprimento do canal (Km). O parâmetro K_{ch} é conhecido como CH-K2 na calibração do SWAT.

Tabela 1- As referências de valores de KC.

Grupo	Características do leito	Condutividade Hidráulica
Taxa de perda muito alta	Pedregulho limpo e areia grosseira	127 mm.h ⁻¹
Taxa de perda alta	Areia e pedregulho limpo	51 – 127 mm.h ⁻¹
Taxa de perda moderadamente alta	Mistura de areia e pedregulho com baixo teor de material silto-argiloso	25 mm.h ⁻¹
Taxa de perda moderada	Mistura de areia e pedregulho com alto teor de material silto-argiloso	6 - 25 mm.h ⁻¹
Taxa de perda de baixa a insignificante	Leito de material consolidado alto teor de material silto-argiloso	0,025 – 2,5 mm.h ⁻¹

Fonte: Neitsch *et al.* (2005).

2.5 Análise morfométrica

Para a caracterização morfométrica da bacia do rio Apeú foi utilizado às metodologias propostas por Horton (1945), Strahler (1957), Christofletti (1969), entre outros. Em que foi analisado o parâmetros relativos à área da bacia, o perímetro, a densidade da drenagem, o fator de forma, o coeficiente de compacidade, o índice de circularidade, a declividade média e a ordem hierárquica dos canais.

Segundo Tonello *et al.* (2006), as características morfométrica podem ser divididas em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem. Para a realização dos cálculos foi utilizado o software ArcGis 10.3 e as definições foram baseadas em Antoneli e Thomaz (2007), Christofolletti (1969), Villela e Mattos (1975), Tonello *et al.* (2006) e Cardoso *et al.* (2006). E A partir de estudos de Teodoro *et al.* (2007) e de Doriguel, Campos e Delmanto Junior (2015).

Características geométricas

- Área total: Toda área drenada pelo sistema pluvial inclusa entre seus divisores topográficos, projetada em plano horizontal, sendo elemento básico para o cálculo de diversos índices morfométricos.
- Perímetro total: Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas.
- Coeficiente de compacidade (Kc): Relação entre o perímetro e a área da bacia, em que, se a bacia for irregular, maior será o coeficiente de compacidade e menos sujeita à enchentes, sendo: Kc entre 1 – 1,25 (redondas para ovaladas); e, entre 1,25 – 1,50 (ovaladas); entre 1,50 – 1,70 (longas).
- Fator de Forma (F): Relaciona a forma da bacia com a de um retângulo, correspondendo à razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão), podendo ser influenciada por algumas características, principalmente pela geologia.
- Índice de circularidade (IC): É a relação entre o perímetro e a área da bacia.

Características do relevo

- Declividade: A declividade relaciona-se com a velocidade em que se dá o escoamento superficial, afetando, portanto, o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem das bacias, sendo que os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia.
- Altitude: A variação de altitude associa-se com a precipitação, evaporação e transpiração, conseqüentemente sobre o deflúvio médio.
- Amplitude: É a variação entre a altitude máxima e altitude mínima.

Características da rede de drenagem

- Comprimento do curso d'água principal.

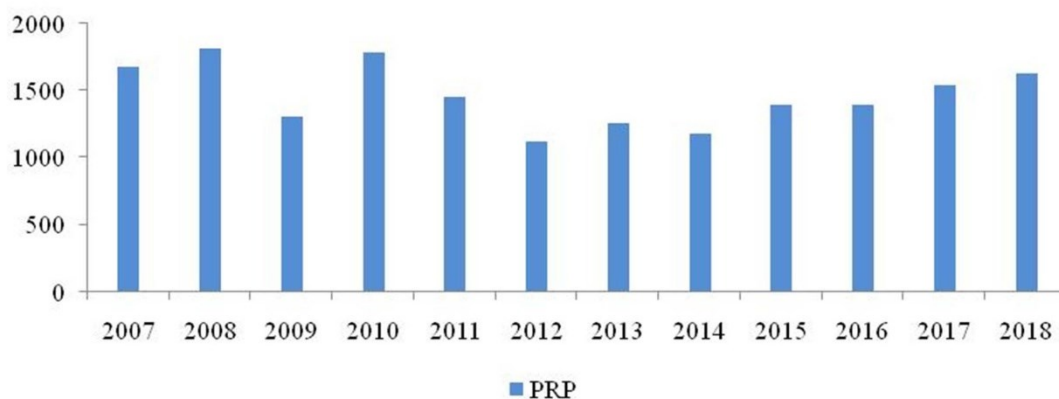
- Comprimento total dos cursos d'água.
- Densidade de drenagem (Dd): É a correlação do comprimento total dos rios com a área da bacia.
- Ordem dos cursos d'água: A classificação dos rios quanto à ordem reflete no grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao representar o caminho que água percorre na bacia hidrográfica, onde a precipitação é a principal entrada, a qual propicia os divisores de água que limitam e definem o fluxo hídrico e permite o estabelecimento de um padrão de drenagem, passível de ser identificado, quantificado, classificado e caracterizado (SOUSA *et al.*, 2016). Na bacia do rio Apeú, a precipitação apresentou uma distribuição uniforme considerada igual por toda bacia. Em que é perceptível na figura 2, que os anos com maiores volumes de precipitação aconteceram entre 2008 e 2010, enquanto que os anos entre 2012 e 2014 apresentaram menores valores. Podendo está relacionado com a variabilidade climática local.

Segundo Menezes, Fernando e Rocha (2015) a distribuição da precipitação pluviométrica sobre o estado do Pará é caracterizada pela alta variabilidade espacial e temporal, e as precipitações são predominantemente do tipo convectivas, e constitui um dos elementos climáticos de maior importância para o condicionamento social e econômico em todos os estágios de desenvolvimento. E isso está relacionado com o fato das precipitações anuais na Amazônia Oriental, onde está localizado a área em estudo tender a decrescer do setor costeiro para o interior, decorrente da forma como se originam os sistemas de circulação ao penetrarem a região. Assim, fenômenos de escala planetária como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e fenômenos de mesoescala como as Linhas de Instabilidade (LIs), têm grande influência na climatologia da precipitação desta região.

Figura 2- Comportamento da média anual da precipitação no período de 2007 a agosto de 2018.



Fonte: Autor.

A precipitação após seu contato com o solo, parte dela é escoada, outra é infiltrada e/ou percolada, dependendo das características físicas da bacia. Estudos como o de Lorenzon, Dias e Tonello (2015), Da Luz *et al.* (2015) e Pinheiro *et al.* (2018) demonstram que as características físicas de uma bacia influenciam diretamente no caminho da água percorrido. Nesse sentido, a bacia do rio Apeú apresenta em sua composição, 41% de áreas antrópicas agrícolas, 35% de floresta mista (primária e secundária), 12% de área urbana, 11% de pastagem e apenas 1% compõem a mineração e os corpos hídricos. Vale destacar que a bacia possui apenas 35% de as áreas compostas por floresta, em contrapartida com 65% do resto de sua área é considerada impermeabilizada.

Hoffmann e Nanni (2017) identificaram em pesquisas parecidas aplicadas em uma bacia hidrográfica em Santa Catarina, que através dos diversos uso e cobertura do solo, foi perceptível que a floresta permite uma melhor infiltração da água nos solos, favorecendo o escoamento subsuperficial e subterrâneo, diferente do comportamento da água em outros tipos de usos do solo, como o caso da área urbana, que demonstrou desempenho ao contrário do que na floresta.

Benini e Rosin (2017) mostraram que ocupações próximas às áreas de drenagem são apenas parte de um problema das dinâmicas fluviais, pois as “alterações decorrentes do uso do solo, como a retirada da vegetação e a impermeabilização do solo, causam um dos impactos humanos mais significativos no ciclo hidrológico”, como por exemplo, os problemas de drenagem urbana – inundação.

Quando associados ao tipo de solo presentes na bacia (92% de Latossolo Amarelo e 8% de Gleissolo Háplico) é percebido que apesar de, em quase sua totalidade a bacia do rio Apeú ser composta por Latossolo Amarelo, sendo considerado um solo

com perfil muito homogêneo e de boa drenagem, ainda sim gera escoamento superficial quando associados ao uso do solo da bacia, e também por está próximo ao Gleissolo Háptico, devido este tipo de solo ser considerado de má drenagem, o qual está localizado próximo ao seu exutório.

Outro fator influenciador do escoamento da água na bacia hidrográfica são as características morfométrica, em que, ao calcular às características da bacia do rio Apeú, foi possível obter como resultado uma área de drenagem total de 307 km², cujo perímetro calculado foi de 132,16 km e o fluxo de água se dá na direção N-SE da bacia. O comprimento total da rede de drenagem é de 173 km, possuindo 33 canais, o que demonstra que a bacia é ramificada, e bem distribuída podendo ser caracterizada como uma bacia de 3ª ordem (STRAHLER, 1957).

O baixo valor do fator de forma (0,59) obtido para o rio Apeú indica que ela possui um formato mais alongado, permitindo interpretar a ocorrência de um número significativo de tributários atingindo o rio principal, sobretudo no médio e alto curso, aumentando a taxa de escoamento superficial no baixo curso e conseqüentemente ocasionando áreas alagadas no baixo curso durante a maior parte do ano (SOUSA *et al.*, 2016).

O fator de forma é um importante parâmetro para a determinação do tempo de concentração, que indica o tempo necessário para a contribuição de água da bacia após um evento de precipitação, assim quanto maior este tempo menor será a vazão máxima (CAMPOS *et al.*, 2015).

O Índice de circularidade (0,22) e o coeficiente de compacidade (2,11) também evidenciam que a bacia do rio Apeú possui uma forma alongada e segundo os estudos realizados por Doriguel, Campos e Delmanto Junior (2015) mostram que valores do IC menor que 0,51, a bacia é mais alongada favorecendo desta forma a infiltração, aumentando o tempo de concentração na sub-bacia.

A densidade de drenagem obtida foi de 0,5 km/km², podendo afirmar que ela é uma bacia com drenagem pobre (VILLELA E MATTOS, 1975), demonstrando que a bacia do rio Apeú apresenta baixa drenagem, apesar de apresentar um número considerável de ramificações de rede de drenagem (33 canais).

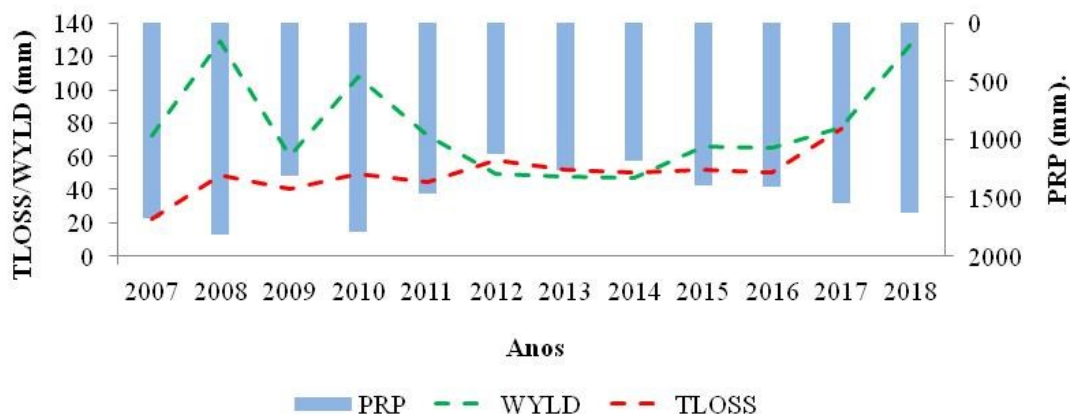
A declividade média encontrada da bacia foi de 1,9%, sendo classificada com um relevo plano, segundo a EMBRAPA (2006) que considera superfícies com declividade entre 0 e 3%, apresentando terrenos com topografia horizontal, com poucos desnivelamentos.

Nesse sentido, o modelo SWAT foi capaz de determinar o movimento de água precipitada na bacia do rio Apeú, através da simulação do balanço hídrico (Sabzevari *et al.*, 2010), obtendo como resposta a quantidade total de água que entra no canal principal (rendimento de água - WYLD), através dos afluentes, durante o período em estudo, bem como as perdas de água (TLOSS) através da evapotranspiração (evaporação da água e transpiração das plantas).

Ao analisar essa simulação (Figura 3) é perceptível que em 2008 foi o ano em que a bacia hidrográfica do rio Apeú apresentou maior média de produção de água propagada (129,06 mm) e coincidentemente a menor perda (22,44 mm), com uma precipitação de 152 mm, enquanto que o ano que apresentou menor volume (46,79) foi o ano de 2014, com uma perda de 51,88 mm, com um total de precipitação de 99 mm.

Contudo, os anos de 2012 a 2014 obtiveram precipitações baixas, não ultrapassando 110 mm, em que a bacia hidrográfica do rio Apeú apresentou um rendimento de menos que 50% de WYLD, obtendo uma perda de grande volume de água por evapotranspiração e evaporação. Enquanto que, o ano de 2017 e até o mês de agosto de 2018, o WYLD e o TLOSS se mantiveram em equilíbrio.

Figura 3- Gráficos do comportamento da produção e perdas de águas no período de 2007 a 2018.



Fonte: Autor.

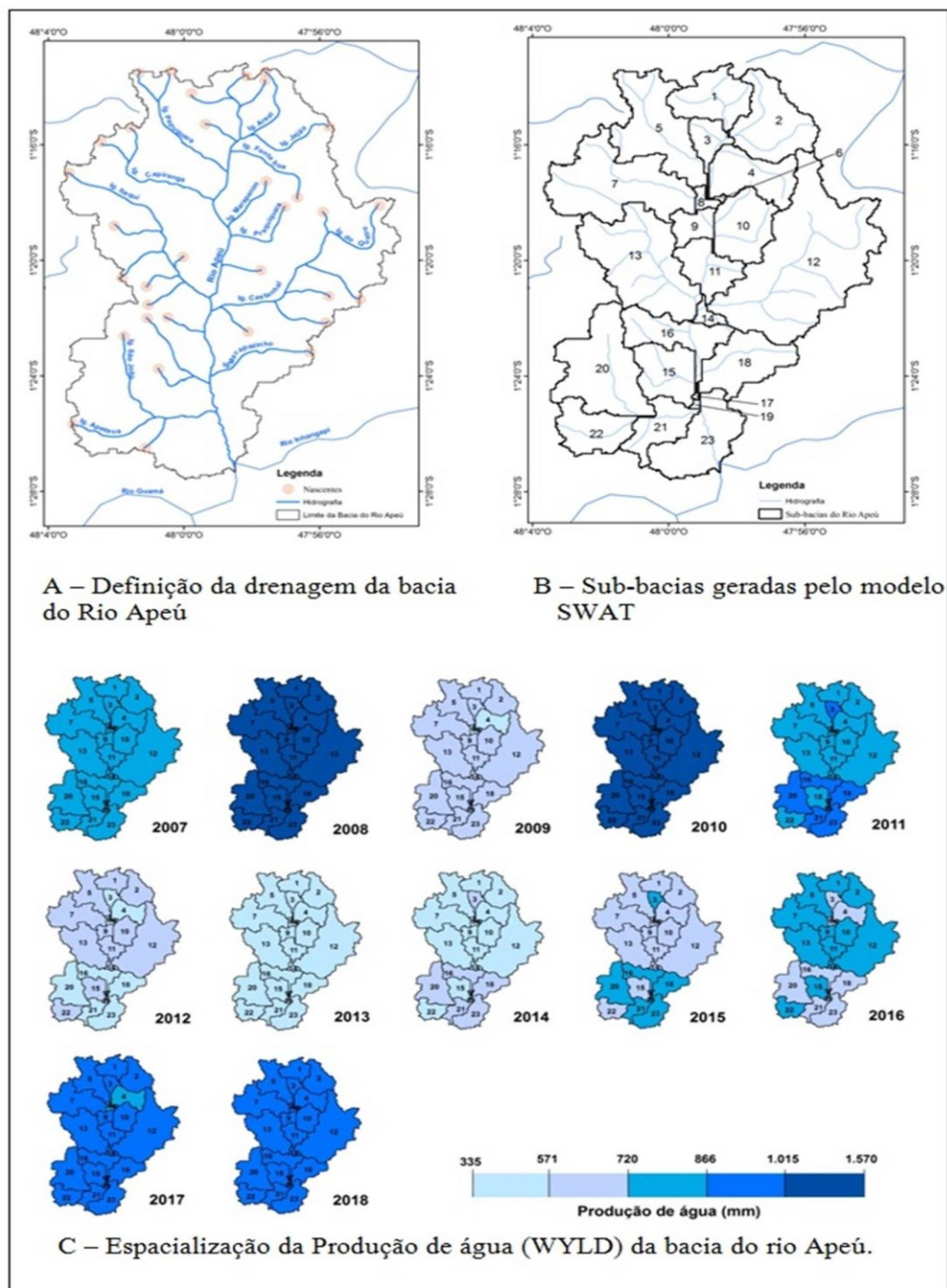
Essa variação da quantidade produzida e a quantidade perdida de água na bacia do rio Apeú, têm diversos motivos, sendo primeiramente uma resposta das chuvas, que entram na bacia, como vimos anteriormente, mas a sua permanência é influenciada pelo uso e ocupação do solo no seu entorno. Em que, esta influência pode ser comprovada no estudo de Santos; Griebeler e Oliveira (2010) que verificaram o comportamento hidrológico associado à variabilidade climática e ao uso do solo, ao longo de 25 anos, na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite, em Goiânia, onde constataram que as

alterações no uso do solo influenciaram no escoamento da água, mesmo no período de redução das chuvas, causando um aumento de WYLD na bacia.

Locais que ainda mantêm a mata ciliar preservada tendem um aumento na quantidade de WYLD, pois oferecem uma maior taxa de infiltração da água no solo e consequentemente um aumento na alimentação dos lençóis freáticos, proporcionando um regime sustentável na produção hídrica, enquanto áreas sem a proteção (área urbana, pasto, áreas agrícolas e mineradoras) provocam escoamentos superficiais intensos, erosões e podendo provocar ainda nos períodos de estiagem, a diminuição do corpo d'água decorrente dos déficits hídricos podendo até seca (SOUSA *et al.*, 2016).

Isso é mais bem visualizado quando espacializados por sub-bacias geradas pelo modelo, onde é possível ver a distribuição temporal que cada sub-bacia contribui com o rio principal, nos anos de 2007 a agosto de 2018 (Figura 4B e 4C). Além de como está distribuída a drenagem no espaço e a localização das nascentes (Figura 4A). Em que foi possível confirmar que o ano de maior produção foi o de 2008 e os de menor produção foi o ano de 2014. Contudo, é perceptível que os outros anos há uma variação de contribuição por sub-bacias, onde a bacia de número 4 é a que menos contribuiu em todos os anos (Figura 4).

Figura 4- Espacialização dos cursos produção de água na bacia do rio Apeú.



Fonte: Autor.

De acordo, com o anuário estatístico do Pará (FAPESPA, 2016), houve um aumento de 20 % na demografia do município de Castanhal, em 2008 o município apresentava uma população de 155,26 habitantes por km², já em 2016, esta população saltou para 187,16 habitantes por km². Somada ao aumento populacional, ocorreu também o aumento das áreas desmatadas que em 2008 eram de 898 km², já em 2017

estas áreas foram de 905,8 km², ocasionando a perda de 4 % nas áreas de floresta na bacia (PRODES, 2018).

Estes aumentos demonstraram uma relação direta com a expansão da pecuária na região, que desde 2008 vem aumentando, chegando a uma expansão de 10 % no município (2017). Houve também um aumento da infraestrutura da região, o censo de 2010 apontou que 36,1 % da região receberam esgotamento sanitário, 16,9 % das ruas eram arborizadas e 13,9 % do município estavam urbanizados, um aumento de 15 % quando comparado a 2008 (IBGE, 2018).

As formas como a população usufruem dos recursos hídricos interferem diretamente na quantidade e qualidade das águas. Na bacia do rio Apeú as diversas formas de uso do solo tem influenciado nas suas características físicas, podendo interferir em todo sistema, segundo Zanata *et al.* (2015), a bacia é um sistema aberto, onde o fluxo de matéria e energia é dinâmico e altamente dependente da gestão dos solos.

Vale ressaltar que a vegetação ao longo dos afluentes do rio Apeú possui um papel fundamental na vida útil da bacia, entretanto observa-se no local que grandes extensões não cumprem a proteção prevista pela legislação, onde é agravada pelas ações ilegais de desrespeito ao Código Florestal brasileiro, no que concerne à manutenção da floresta natural ao longo dos rios e nascentes, como também a falta de fiscalização e dificuldades na recuperação destas áreas (DE ALMEIDA; VIEIRA, 2014).

Estudos, como os de Vale, Bordalo e Fonseca (2015) comprovam que o maior agente transformador da paisagem na área da bacia hidrográfica do rio Apeú é a ação antrópica, em virtude das atividades econômicas que foram estabelecidas ao longo dos anos. A paisagem predominante na área é a de pastagem, em seguida têm-se as áreas remanescentes de vegetação e as áreas de plena expansão urbana. A vegetação de tipologia arbórea da bacia hidrográfica do rio Apeú encontra-se bastante fragmentada, caracterizada pela presença de um grande número de fragmentos pequenos, demonstrando o forte impacto da atividade humana na área.

4 CONCLUSÃO

A bacia do rio Apeú, em geral, encontra-se em um nível de produção de água considerado normal apesar das diferentes influências no entorno de suas nascentes, o grau de degradação é considerado estável no período estudado, sendo coerente com as

quantidades de chuvas na região, bem como, a simulação do modelo, que foi de forma coerente na sua distribuição.

Cada sub-bacia em que o modelo subdividiu possui áreas diferentes, variando de 0,18 km² (sub-bacia 17) a 56 Km² (sub-bacia 12), não ultrapassando 100 km², uma vez que áreas maiores do que esses valores podem sofrer efeitos de escala, ou seja, diferentes usos e tipos de solos, alterações atmosféricas, diferenças na rede de drenagem, resultando em processos hidrológicos com comportamentos distintos.

A diminuição da produção de água na bacia hidrográfica do rio Apeú está intimamente ligada às alterações ocorridas ao longo dos anos na bacia, isto demonstra que além de ser um indicador de alterações pode auxiliar no gerenciamento ambiental, apontando alterações nos cursos d'águas e nas suas nascentes, modificando a sua forma e consequentemente afetando a produtividade econômica, a segurança social e ambiental da população local.

A produção de água na bacia, desde 2008 vem diminuindo em até 60%, decorrente das transformações ocorridas no seu entorno. Dada principalmente pela influência antrópica que promoveu grandes alterações na dinâmica natural do rio diminuindo sua capacidade de produção.

Nesse sentido, a bacia do rio Apeú mostrou que o processo de uso e ocupação nas suas proximidades influencia diretamente na produção de água da mesma, necessitando de medidas que tendem promover a sua recuperação, para que os afluentes e nascentes sejam preservados, e com isso manter a contribuição de água em direção ao rio Inhangapi.

CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A HIDROLOGIA DA BACIA³

RESUMO

Modificações no uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas podem ocasionar alterações nas componentes hidrológicas, por isso modelos capazes de antecipar estas mudanças são de fundamental importância para o entendimento dos componentes do ciclo, além de auxiliar no planejamento e na tomada de decisões. O objetivo do estudo foi simular cenários, a partir do modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Apeú (Castanhal/PA) e com isso, verificar o comportamento dos processos hidrológicos a partir de diferentes condições de uso e cobertura do solo. Os cenários avaliados foram: Cenário I: Uso atual, levando em consideração os usos do solo conforme os dados do TerraClass em 2014; Cenário II: Levando em consideração as áreas de proteção na bacia e respeitando a legislação do código florestal (nº. 12.651) brasileiro de 2012 e; Cenário III: Considerando as áreas de florestas do cenário I (>35% da área da bacia) convertidas em área urbana. Os resultados demonstraram a eficiência do modelo em representar o regime hidrológico da área estudada para todos os cenários avaliados. Além disso, pode-se aferir que o cenário II resultou em um aumento de 41% no escoamento subterrâneo, enquanto que o superficial apresentou uma diminuição de 51%. Já no cenário III houve uma diminuição de 58% no escoamento subterrâneo, em compensação o escoamento superficial aumentou 21%. Esse comportamento foi atribuído ao aumento da vazão no cenário de floresta, devido à vegetação possibilitar uma maior estabilidade dos canais pela proteção dos solos nas margens dos rios, reduzindo a erosão dos canais e diminuindo o assoreamento dos corpos d'água, estabilizando assim o canal.

Palavras Chave: SWAT, Balanço hídrico, vazão.

ABSTRACT

Modifications in the use and occupation of the soil in hydrographic basins can cause alterations in the hydrological components. The objective of the study was to simulate

³ Artigo submetido à Revista Sociedade & Natureza, Qualis A2, em Ciências Ambientais.

scenarios, based on the SWAT model, in the Apeú river basin (Castanhal / PA). And with this, to verify the behavior of the hydrological processes under different conditions of use and soil cover. The scenarios studied were: I) Current use, taking into account land uses according to TerraClass 2014 data; II) Taking into account the protection areas respecting the legislation of the Brazilian forest code of n.º 12,651 / 2012 e; III) considering the forest areas (> 35% of the area of the basin) converted into urban area. The results demonstrated the efficiency of the model in representing the hydrological regime of the studied area. In addition, it can be verified that scenario II resulted in a 41% increase in the underground flow, while the surface showed a decrease of 51%. In scenario III there was a decrease of 58% in the underground flow, in compensation the runoff increased by 21%. This behavior was attributed to the increase of the flow in the forest scenario, due to the vegetation to allow a greater stability of the channels by the protection of the soils in the river banks, reducing the erosion of the channels and reducing the silting of the bodies of water, thus stabilizing the channel.

Key words: SWAT, water balance, flow.

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Apeú, vem sofrendo inúmeras transformações desde a década de 80, quando surgiu a Vila Apeú (SILVA, 2017). A exploração das suas margens teve início com a ocupação do seu território e descaracterizou boa parte da paisagem da região, que atualmente é composta por áreas urbanas, pastos, agriculturas, áreas de minérios e de lazer. Estas alterações impostas aos ecossistemas geram impactos na bacia hidrográfica, principalmente no ciclo hidrológico (GARBOSSA *et al.*, 2013).

Por está inserida no Bioma Amazônico, a vegetação encontrada na região é caracterizada pelo tipo de floresta ombrófila densa ou floresta densa de terra-firme, tendo sua estrutura palmácea e árvores de grande porte (50 m de altura), ocorrendo ainda áreas de vegetação secundária e capoeiras, consequências de ações antrópicas (PEREIRA *et al.*, 2012). Essas supressões da vegetação próxima à bacia hidrográfica advindas dessas ações desencadeiam severos problemas e impactos negativos, com destaque a erosão hídrica, perda de qualidade dos solos, redução de oferta hídrica e drástica alteração da cobertura vegetal (FERREIRA; COELHO, 2015).

Nesse sentido, com o intuito de preservar os recursos hídricos foi criado a Lei de nº. 12.651/2012, que dispõem das áreas de preservação permanente (APP) descritas no Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), que tem como finalidade proteger as áreas cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, assegurar o solo e o bem estar das populações humanas.

Assim, compreender os efeitos da modificação da cobertura do solo sobre a dinâmica da água é de grande importância para o auxílio na tomada de decisão, visando o gerenciamento dos recursos hídricos (KUNHLE *et al.*, 1996; DE ANDRADE *et al.*, 2017).

A utilização de modelos tem se tornado cada vez mais frequentes para o gerenciamento de bacias hidrográficas e a avaliação de impactos causados pela ação antrópica sobre a disponibilidade e a qualidade da água. Estes modelos servem como uma ferramenta para auxiliar na determinação dos impactos da ocupação antrópica e dessa forma possibilitar a criação de diferentes cenários usados nestas avaliações (BOURAOUI *et al.*, 1997; GARBOSSA, 2013).

Algumas pesquisas envolvendo a utilização de modelos hidrológicos vêm sendo realizados no Brasil (GARBOSSA *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018), para avaliar os impactos das mudanças de uso e ocupação do solo, no escoamento superficial e na vazão. Dentre esses modelos, destaca-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) que foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, bem como a vazão e na qualidade das águas (NEITSCH *et al.*, 2005; PERAZZOLI *et al.*, 2013).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é simular cenários, a partir do modelo SWAT, na bacia hidrográfica do rio Apeú (Castanhal/PA). E com isso, verificar o comportamento dos processos hidrológicos a partir de diferentes condições de uso e cobertura do solo.

2 MATERIAL E METÓDOS

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Apeú, localizado na região metropolitana de Belém, com área de aproximadamente 307 km². Desta, cerca de 70 % pertencem ao município de Castanhal, 20 % ao município de Inhangapi e 10 % ao município de Santa Izabel do Pará (PEREIRA, 2012). Sua principal drenagem atravessa

a Vila do Apeú, o rio Apeú possui em sua extensão cerca de 27,87 km, sendo sua nascente situada no município de Castanhal e escoar no sentido sudoeste, até sua foz no rio Inhangapi.

O clima da região é classificado como do tipo Ami, de acordo com Koppen. As temperaturas máximas e mínimas são de 35 e 18 °C, respectivamente, com temperatura média anual de 26 °C. A umidade relativa média e chuva anual são de 80% e 2.571,6 mm, respectivamente (DA SILVA FARIAS, 2017).

A bacia é composta por 41% de áreas antrópicas agrícolas, 35% de floresta mista (primária e secundária), 12% de área urbana, 11% de pastagem e 1% compõem a mineração e os corpos hídricos (Informações especializadas a partir do projeto TerraClass 2014). Sendo que, sua área é predominantemente formada pelo tipo de solo Latossolo amarelo (92%), contendo apenas 8% de Gleissolo Háptico (IBGE, 2018; SANTOS *et al.*, 2018).

Simulação de Cenários

A simulação dos cenários de uso e ocupação do solo ocorreu dentro do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), o qual funciona a partir da entrada de dados tabulares, compostos por dados climatológicos (precipitação, umidade relativa, direção dos ventos e temperatura), que são utilizados para a caracterização climática da bacia e iniciar os processos de transformação chuva-vazão-erosão (SANTOS *et al.*, 2018). As bases espaciais são constituídas pelo Modelo Numérico de Terreno (MNT), mapa de uso e ocupação do solo, e mapa dos tipos de solos, que são utilizados para a delimitação e identificação das sub-bacias e fluxos de drenagem (DE MEDEIRO; SILVA, 2017). Neste estudo foi utilizado o MNT com resolução espacial de 90 m, adquirido da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Para a estimativa da infiltração, do escoamento superficial e da força de desprendimento pelo fluxo da água é necessária a determinação do balanço hídrico. Para isso, o modelo SWAT utiliza a seguinte equação:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (PRP - SURQ - Et - PERC - QR) \quad (1)$$

Onde: precipitação (PRP) (mm); evapotranspiração (Et) (mm); Escoamento superficial (SURQ) (mm); escoamento subterrâneo (GW_Q) (mm); quantidade de água no solo final e inicial (SW e SW₀, respectivamente) (mm); percolação (PERC) (mm), fluxo de retorno (QR) (mm) (é o escoamento de água no interfluxo, sobre a superfície do terreno,

após emergir da superfície, ocorrida através da ascensão capilar), o tempo (t) (dias) e produção de água total da sub-bacia que alcança o canal (WYLD) (mm), as quais foram simuladas para os anos analisados. Maiores informações, sobre o funcionamento do modelo SWAT podem ser obtidos, em Neitsch *et al.* (2011) e Abbaspour (2015).

Para a calibração do modelo, isto é, o ajuste entre os dados observados e os dados simulados de vazão, foi utilizado o software, denominado SWAT Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP), desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2007). Ele é utilizado na autocalibração dos parâmetros que influenciam diretamente no escoamento superficial. O algoritmo utilizado nesse estudo, foi o Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) (ABBASPOUR *et al.*, 2004; 2007), sendo este um dos mais utilizados ao modelo SWAT no mundo (NARSIMLU *et al.*, 2015; DA SILVA; HENRIQUE; CAZÉ, 2018).

Quinze parâmetros de entrada do modelo foram utilizados na etapa de calibração, os quais foram obtidos após 2 iterações, padronizadas com 500 simulações cada, usando o software SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2015). Adotou-se o valor de 500 iterações por este ser o valor em que o SWAT-CUP já obtém um ajuste satisfatório para a série de dados utilizados, não necessitando aumentar ainda mais o número de iterações. Os parâmetros do modelo obtidos na calibração, a descrição e sua faixa de variação admitida no programa encontram-se na Tabela 1.

Tabela1- Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT e suas respectivas faixas de variação.

Parâmetro	Descrição	Faixa de variação
CN2	Coefficiente de rugosidade do canal principal (m-1/3 s).	35 a 98
ALPHA_BF	Fator do fluxo de base (dia).	0 a 1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	0 a 500
REVAPMN	Percolação para o aquífero profundo	0 a 500
DEEPST	Profundidade inicial de água no aquífero profundo (mm H ₂ O)	0 a 50000
GWQMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	0 a 5000
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo (mmH ₂ O mmsolo ⁻¹)	0 a 1
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	0 a 1
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação	0.02 a 0.2
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	0 a 1
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	0.05 a 24
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal	-0.01 a 0.3
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)	0 a 150
LAT_TTIME	Escoamento lateral (dias)	0 a 180
CANMX	Água interceptada (mm)	0 a 100

Fonte: Autor.

Para avaliar o desempenho do modelo quanto ao ajuste entre os dados observados e simulados, foram usados os seguintes testes estatísticos: (a) o coeficiente de eficiência- NS (NASH; SUTCLIFFE, 1970); e (b) o coeficiente de determinação de Pearson (R^2). O NS faz uma análise entre os dados estimados e os observados, podendo variar de $-\infty$ a 1, quanto mais próximo de 1 for o resultado, melhor será o desempenho do modelo. Já o R^2 calcula a relação linear entre duas variáveis, que nesse estudo foram os valores estimados e os observados de vazão (SILVA *et al.*, 2013; SILVA; HENRIQUE; CAZÉ, 2018).

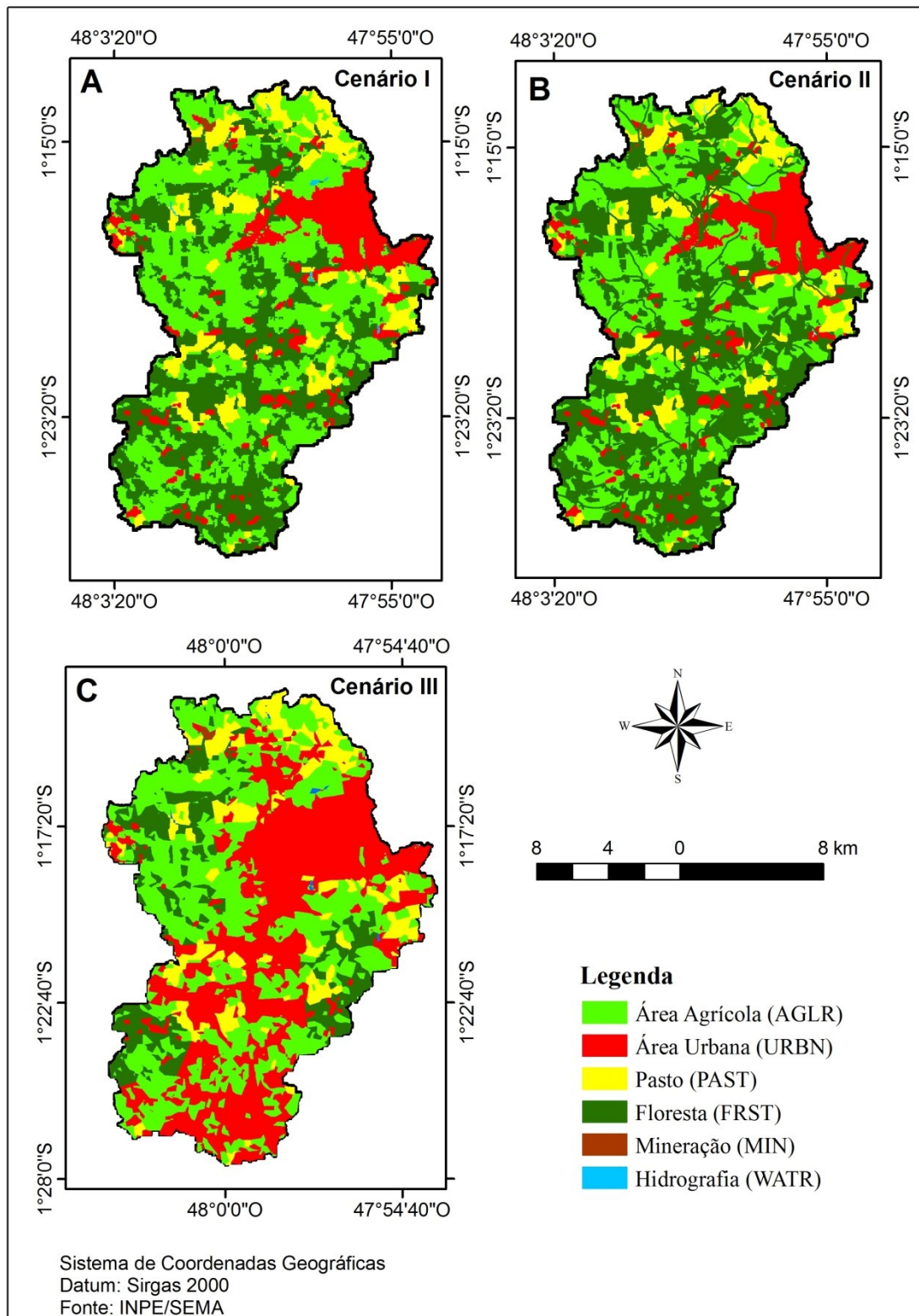
O período de simulação utilizado no modelo foi de janeiro de 2007 a agosto de 2018. Para a etapa de calibração, foi selecionado o intervalo de dados diários de vazão

compreendidos entre o período de outubro de 2017 a março de 2018, enquanto que para a validação do ajuste do modelo foi selecionado o período de abril a agosto de 2018. Os dados de vazão foram coletados e encontram-se detalhadamente descritos em Santos *et al.* (2018). Para que coincidissem os pontos de medição da velocidade da água com os pontos de saída, neste estudo a sub-bacia 10 foi utilizada para a análise da comparação da vazão simulada pelo modelo.

Após a validação do modelo foram aplicados, três cenários, avaliando o comportamento dos componentes do ciclo hidrológico (vazão) em função dos mesmos:

- Cenário 1: Uso do solo atual, levando em consideração os usos do solo conforme os dados do TerraClass 2014 (Figura 1A);
- Cenário 2: Considerando o uso do solo respeitando a legislação do código florestal brasileiro de n°. 12.651/2012 (Figura 1B), onde se levou em considerações as áreas de preservação permanentes, o entorno dos rios, afluentes e nascentes, respeitando as faixas de proteção de 30 metros (para os cursos de menores de 10 metros de largura) e 50 metros (para as áreas do entorno de nascentes), bem como, as áreas de reserva legal legalizadas pela base de referências do Cadastro Ambiental Rural (CAR) (SEMAS, 2019);
- Cenário 3: Considerando as áreas de florestas do cenário I (>35% da área da bacia) convertidas em área urbana (Figura 1C).

Figura 1- Representação dos cenários I, II e III de uso e ocupação da terra.



Fonte: Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O termo “Cenário” pode ser descrito como uma forma de prever hipoteticamente uma situação, podendo servir de alerta para algum parâmetro ou apenas para demonstrar uma conjuntura em que se busca estudar e/ou conhecê-la (MAGANO *et al.* (2016). O uso do solo de forma irregular associados a eventos hidrológicos ocasionam problemas na drenagem e com isso, mudanças nas condições naturais da bacia do rio Apeú.

O processo de urbanização as margens da bacia tem gerado impactos significativos, como a transformação da paisagem resultando na impermeabilidade do solo. Com o aumento das áreas impermeáveis têm-se a dificuldade na infiltração das águas da chuva, causando um desequilíbrio hidrológico (TARGA *et al.*, 2012). Assim como, as práticas agrícolas e mineradoras causam um desequilíbrio na paisagem, trazendo impactos, principalmente no que tange à disponibilidade de água, nessas técnicas aplicadas é possível perceber no entorno da bacia modificações que envolvem aspectos relacionados ao solo, ao relevo e a água.

Assim, as áreas verdes se tornam de suma importância para se alcançar a qualidade ambiental, segundo Silva e De Almeida (2016) a presença das mesmas, ocasiona benefícios sociais, relacionado ao lazer, psicológicos, com o alívio das tensões diárias, ecológico, relacionado à qualidade do ar, água e solo, além da regularização do clima, ajuda a reduzir o escoamento superficial das águas, o que evita diversos problemas de drenagem.

Nesse sentido, a bacia do rio Apeú foi dividida através do modelo SWAT em 23 sub-bacias, em que o exutório corresponde a sub-bacia de número 23, com áreas variando de 0,18 e 55,89 Km². Ainda foram geradas 23 unidades de respostas hidrológicas (HRU's) que são a combinação de uso do solo, tipo de solo e classe de declividades dominantes na bacia, estes valores foram utilizados na avaliação dos diferentes cenários adotados.

Na tabela 2 são apresentadas as áreas totais e relativas ao uso do solo da bacia do rio Apeú, para os três cenários. Em comparação do cenário I com o cenário II, houve uma diminuição nas áreas usadas na agricultura ($\pm 14\%$), em pasto ($\pm 11\%$), na área urbana ($\pm 5\%$) e na mineração ($\pm 12\%$) e um ganho na área de floresta ($\pm 23\%$). Já em relação ao cenário III, houve uma perda de parte da área de floresta ($\pm 55\%$) que passou a ser ocupada por área urbana, enquanto que as demais áreas mantiveram inalteradas ou a alteração foi mínima (área agrícola).

Tabela 2- Uso do solo para os três cenários (I, II e III).

Uso do solo	Cenário I (uso atual)		Cenário II		Cenário III	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Áreas Agrícolas	127,6	42	109,4	36	118,0	38
Pasto	34,6	11	30,7	10	34,6	11
Florestas	105,3	34	129,7	42	48,2	16
Área Urbana	38,5	13	36,4	12	105,2	34
Mineração	1,0	0	0,7	0	1	0
Total	307,0	100	307,0	100	307,0	100

Fonte: Autor.

Após a simulação pelo modelo, são gerados diversos resultados que demonstram o comportamento das diversas variáveis que compõem o ciclo hidrológico, como, por exemplo, a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial, o fluxo de base, a ascensão capilar, a percolação para o aquífero raso, a recarga para o aquífero profundo e entre outros.

A sub-bacia 10 apresentou uma precipitação média de 1.465 mm e a evapotranspiração potencial ou de referência foi igual a 986 mm para todos os cenários. Com relação ao escoamento subterrâneo, quando comparado ao cenário I, no cenário II foram maiores em $\pm 40\%$ (640 mm) e diminuíram em $\pm 43\%$ com relação ao cenário III (263 mm). Já o escoamento superficial para o cenário II foi de 201 mm (redução de $\pm 50\%$), enquanto que o cenário III é de 480 mm (aumento de $\pm 20\%$). Os valores de percolação e teor de água no solo foram de 701 mm e 2.323 mm para o cenário II e 298 mm e 1.810 mm para o cenário III, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3- Processos hidrológicos simulados pelo SWAT para os cenários I, II e III.

Processos hidrológicos	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Precipitação (mm)	1.465	1.465	1.465
Escoamento Subterrâneo (mm)	454	640	263
Escoamento Superficial (mm)	398	201	480
Evapotranspiração Real (mm)	556	557	553
Evapotranspiração potencial (mm)	986	986	986
Percolação do aquífero raso (mm)	505	701	298
Teor de água no solo (mm)	2.323	2.320	1.810

Fonte: Autor.

Percebe-se pelos diferentes valores de algumas variáveis do ciclo hidrológico (Escoamento subterrâneo e superficial, Evapotranspiração Real e Percolação) entre os cenários simulados, que o modelo SWAT apresentou sensibilidade e compreendeu os impactos dos diferentes cenários ao simular estas variáveis e que pode auxiliar no entendimento das mudanças de uso e cobertura do solo na bacia estudada.

Com essas alterações de volume de água escoada entre os cenários, era de se esperar que o processo de percolação também variasse, sofrendo mudanças nos cenários II, onde há mais áreas de florestas ($\pm 39\%$ de aumento de água percolada) diferentemente do comportamento na área urbana (cenário III) em que a perda foi de $\pm 40\%$ da água percolada, quando comparadas com o cenário I. Bem como, a quantidade de teor de água presente no solo, em que a floresta apresenta uma quantidade de absorção de água de quase 100% em relação à área urbana (13%).

Essas diferenças ocorreram devido às alterações do uso do solo, uma vez que, as áreas urbanas apresentam infraestruturas, como pavimentações, construções, pontes etc., que reduzem bastante a infiltração da água das chuvas no solo, fazendo com que as águas que não infiltram, escoam (SCHNEIDER et al., 2011), diferente das áreas

ocupadas por floresta, que são mais eficientes na renovação hídricas, onde a infiltração da água da chuva é favorecida beneficiando o escoamento subterrâneo e com isso, o escoamento superficial tende a ser mínimo (HONDA; DURIGAN, 2017)

A evapotranspiração apresentou um aumento de 0,2 % no cenário II, enquanto no cenário III ocorreu uma diminuição de 0,5 %, isso também foi observado por Andrade *et al.* (2014) que afirmaram que quando há a retirada da floresta, isso resultará na diminuição da absorção da radiação solar global pela superfície e com isso uma maior remissão da radiação de onda longa da superfície, conseqüentemente, a radiação solar é reduzida sobre a região desmatada. Por sua vez, a redução do comprimento de rugosidade em áreas desmatadas é capaz de afetar o transporte turbulento de calor e vapor de água próximo à superfície. Então, o aumento do albedo e da temperatura da superfície e redução da radiação solar nas áreas desmatadas, resulta em menor evapotranspiração nesses locais, reduzindo assim, a disponibilidade de energia para convecção e precipitação (DOS SANTOS *et al.*, 2014).

Os indicadores de desempenho do modelo SWAT apresentaram um ajuste satisfatório dos dados experimentados, obtendo R^2 igual a 0,86 e NS igual a 0,7, no período de calibração e R^2 igual a 0,98 e NS igual a 0,9 no período de validação, demonstrando que o modelo SWAT apresentou um bom desempenho nas simulações. Nesse sentido, os resultados da simulação de vazão média diária anual com base na alteração do uso do solo, para o período de 2007 a agosto de 2018 são mostrados na tabela 4.

De maneira geral, a vazão foi maior no cenário de floresta (II), para o período estudado (Janeiro de 2007 a Agosto de 2018), conforme também foi obtido por Tambosi *et al.* (2015), pois a vegetação possibilita uma maior estabilidade dos canais pela proteção dos solos nas margens dos rios, reduzindo a erosão dos canais e diminuindo o assoreamento dos corpos d'água. Além de aumentar a estabilidade do canal, a presença de vegetação ripária, aliada à presença de vegetação em outras áreas da bacia, equilibra o fluxo superficial e subsuperficial de água, reduzindo a variação do fluxo hídrico em razão de eventos climáticos, regulando melhor a vazão em épocas de seca e eventos de cheias.

Tabela 4- Simulação da vazão anual com base nos cenários propostos para a bacia do rio Apeú.

Cenários	Vazão anual (mm)			Dp	CV
	Média	Máxima	Mínima		
I (Uso atual)	4,2	7,4	2,7	1,42	33,7%
II	4,1	7,5	2,7	1,43	33,8%
III	3,8	7,0	2,1	1,48	38,8%

Fonte: Autor.

Resultados similares foram encontrados por Garbossa *et al.* (2013) que avaliaram o potencial do modelo SWAT em gerar cenários representativos de disponibilidade hídrica, onde concluíram que a variação de área de floresta afeta a vazão, contudo, perceberam que ocorre um aumento na vazão em área de floresta, quando atribuída ao atendimento a legislação, a qual implica em maior disponibilidade hídrica na bacia estudada.

Assim como no estudo de De Andrade *et al.* (2017), que confirmam que as mudanças no uso do solo exercem influências nos regimes hidrológicos aos quais estão inseridos. A criação de cenários se torna um instrumento de tomada de decisões com o propósito de gestão e conservação dos recursos hídricos, aliado ao modelo SWAT é uma poderosa ferramenta para modelar e analisar a variabilidade espacial do potencial da bacia hidrográfica do rio Apeú.

4 CONCLUSÃO

Foi possível utilizar a modelagem hidrológica, com o modelo SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Apeú, obtendo resultados para as diferentes variáveis que regem os processos hidrológicos. As principais conclusões obtidas a partir deste estudo foram:

- Os processos hidrológicos quando associados aos diferentes usos do solo influenciam diretamente no regime hidrológico da bacia hidrológica do rio Apeú;
- Ao cumprimento da legislação (cenário II) fez com que houvesse um aumento de 41 % no escoamento subterrâneo proporcionando uma redução no escoamento superficial, por outro lado a percolação, a evapotranspiração e o teor de água aumentaram beneficiando o regime hidrológico como um todo;

- Com o aumento das áreas urbanas (cenário III) houve aumentos no escoamento superficial, o que já era de se esperar pela diminuição das áreas de florestas. No entanto, este aumento (21%) não chegou a influenciar na vazão;
- Em comparação com as áreas de florestas (cenário II), apresentou maior vazão, esse comportamento foi atribuído devido à vegetação possibilitar uma maior estabilidade dos canais pela proteção dos solos nas margens dos rios, reduzindo a erosão e o assoreamento dos corpos d'água, estabilizando assim o canal.

Nesse sentido, confirma-se que a presença das florestas nas bacias hidrográficas tem especial papel de manutenção, beneficiando os processos de infiltração, percolação, escoamentos, interceptação e evapotranspiração, além de outros aspectos como regulação do microclima e preservação do solo, tornando-se imprescindível. Dada a importância e necessidade de sua presença, o presente estudo possibilita um conhecimento dos processos hidrológicos envolvidos na bacia hidrográfica do rio Apeú, e demonstra a necessidade de estudos e políticas públicas que conscientizem a população local, como a melhor forma de manter preservado ao entorno da bacia.

CAPÍTULO 5 CARTILHA INFORMATIVA

1 APRESENTAÇÃO

A qualidade da água é um fator determinante para uma boa condição de vida da população. A escassez e a poluição dos recursos hídricos têm consequências sociais, econômicas e ambientais que comprometem o equilíbrio dos ecossistemas, impedindo o desenvolvimento socioeconômico (GUEDES; MAIA, 2011). Os estudos que utilizam a percepção ambiental visam investigar a maneira como o ser humano enxerga, interpreta, convive e se adapta à realidade do meio em que vive, principalmente em se tratando de ambientes instáveis ou vulneráveis socialmente e naturalmente (CARVALHO; RODRIGUES, 2015).

A percepção envolve toda a vida social do ser humano, todo o arcabouço cultural do homem. Interpretar a realidade é inferir percepção para buscar a essência dos problemas ambientais. Este fenômeno perceptivo transcende os limites dos sentidos, revela uma postura e implica em experiências e na firmeza de interesses e valores (FREITAS; ABILIO, 2012).

Ainda para o autor, a base empírica do conhecimento local da população sobre os corpos d'água de uma bacia hidrográfica deve ser valorizada, pois possui um valor socioambiental inigualável. Além disso, os cursos d'água fazem parte da história do indivíduo, da família e da comunidade que integram essa população, ganhando sentidos simbólicos que ocupam uma parte importante de seu patrimônio cultural.

Desta forma, a partir do estudo da percepção ambiental foi possível propor o desenvolvimento de uma cartilha informativa, com figuras ilustrativas, com o objetivo de atrair a atenção das comunidades, de maneira que possa ser desenvolvida uma educação ambiental não formal, direcionada aos problemas locais, buscando assim a sensibilização para o manejo adequado do rio Apeú.

As figuras abaixo exemplificam os conteúdos abordados na cartilha.

Figura 1- Cartilha informativa.



Elaborado por:

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

Aluna de Pós-Graduação (Doutorado) em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

Colaboradores:

ADRIANO MARLISOM LEÃO DE SOUSA

Doutor em recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia

HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

Doutor em Agronomia
Universidade Federal Rural da Amazônia

ARIANNY NAYARA DE SOUZA MIRANDA

Pedagoga
Universidade Estadual do Pará

Apresentação

As constantes modificações na paisagem vêm transformando e representando uma ameaça à qualidade de vida das pessoas e tornando necessária e urgente à busca de soluções para os problemas ambientais.

O rio Apeú, em toda a sua extensão, encontra-se com diversos cenários de usos de solo, os quais são as áreas de florestas, áreas urbanas, áreas agrícolas, áreas de pastos, entre outros.

Esta cartilha tem como objetivo informar a comunidade sobre a importância de se conservar o rio Apeú e com isso obter benefícios e qualidade de vida.

Você conhece o rio Apeú?



Fonte: autor.

O rio Apeú compõe uma das principais sub-bacias que alimentam a bacia hidrográfica do rio Guamá, localizado no nordeste paraense, possui a sua principal

nascente dentro da fazenda Buriti, no município de Castanhal e sua foz no rio Inhangapi, que juntos deságuam no rio Guamá.

Rico na sua beleza e diversidade, o rio Apeú nos apresenta variadas formas de usufruí-lo, como a navegação, a pesca, o uso doméstico, diversão, etc.

Por ser o rio que atravessa por diferentes usos do solo, como por exemplo, áreas urbanas, áreas agrícolas, pastos, etc. ele precisa de atenção e cuidados especiais.

Água

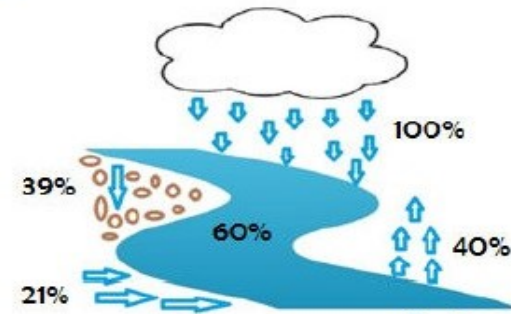


Fonte: autor.

Preservar o rio Apeú se tornou muito importante, para garantir a existência das suas nascentes e qualidade da água, para que todos possam usá-la e ainda assegurar a sobrevivência da fauna e flora.

Estudos comprovam que só no período de 2009 a 2017, da quantidade de chuva precipitada na sub-bacia do rio Apeú, 40% retornaram por evapotranspiração,

21% escoaram superficialmente, 39% escoaram subterraneamente. Esse movimento de água contribuiu com 6% com o aquífero profundo e 60% ficaram na bacia (SANTOS et al., 2018).



Fonte: autor.

Toda água que cai na forma de chuva infiltra no solo, onde recarrega os aquíferos, garantido

água de qualidade e a permanência do rio.

Solo



Fonte: autor.

Após saber da importância de se manter e cuidar da água, outra necessidade urgente é cuidar do reservatório, ou seja, do solo.

Preservar o entorno dos rios é imprescindível para assegurar o equilíbrio ecológico, reduzindo os assoreamentos, entrada de poluentes nos rios, etc. assim garantindo a preservação e a qualidade do rio Apeú.



Fonte: autor.

Meio Urbano

De acordo com o anuário estatístico do Pará (FAPESPA, 2016) houve um aumento de 20% na demografia do município de Castanhal, em que no ano de 2008 o município apresentava uma quantidade de 155,26 Hab/km², enquanto que em 2016, a quantidade de habitante por área era de 187,16 Hab/km².

Quanto à infraestrutura, o censo de 2010 (IBGE, 2018) aponta 36,1% de esgotamento

sanitário, 16,9% de arborização de vias públicas e 13,9% de urbanização no município.



Fonte: Google Earthr.



Fonte: [castanhaleuamoeucuido.](http://castanhaleuamoeucuido.com)

Por que o rio Apeú corre perigo?

Quando olhamos para ele no dia a dia, não percebemos o quanto ele sofre impactos com os nossos usos, seja no momento de uma pesca, seja no momento de navegar, seja no momento de lazer... Até o mínimo contato que temos com ele precisa ter cuidado.

Diversos são os riscos, entre eles estão:

- O desmate da vegetação no seu entorno;
- O lixo descartado nele e nas suas margens;
- O uso de pesticidas próximos do rio;
- O esgoto das residências lançados próximos a ele;
- Canalização do rio para criação de pontes;
- Entre outros.



Fonte: Mapio.net.



Fonte: Fernando et al., 2018.



Fonte: Jaime Alessandro.



Fonte: Google Earth.

O que isso pode causar?



Fonte: pt.dreamstime.com.

Um rio desprotegido pode causar muitos problemas para aqueles que dependem dele de alguma forma, as principais são:

- De saúde: causando doenças de pele, Cólera, Hepatite A, febre tifóide, Amebíase, Ascaridíase ou lombriga, Leptospirose, etc.
- Ao meio ambiente: Diminuição de matéria orgânica, Impermeabilização, desabamento de terras, erosão, perda da fauna e flora, etc.



Fonte: autor.

Como proteger o rio Apeú?



Fonte: hanatemplate.com.

Para garantir a proteção do rio Apeú, algumas dicas de conservação podem ser adotadas

por qualquer pessoa que queiram protegê-lo.

São elas:

- Não desmatar a vegetação no seu entorno;
- Não jogar lixo nele e nas suas margens;
- Não usar pesticidas próximos do rio;
- Não lançar esgotos próximos a ele;
- Entre outros.

O que podemos fazer hoje?

- Se perguntar “como eu estou me relacionando com rio?”
- Conversar com meus vizinhos;
- Mobilizar todos para mutirão de recuperação;
- Ensinar nossos filhos a respeitar o rio;
- Entre outros.



Fonte: Portal do meio ambiente.

Referências

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ/FAPESPA. Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação. Estatísticas municipais paraenses. Belém, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Censo 2010. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=150140>. Acesso em: 15 out. 2018.

SANTOS, J. T. S. dos; NUNES, H. G. G. C.; PONTES, A. K. dos S.; SOUSA, A. M. L. de. O Modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA. REGA, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 1-13. 2018.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO GERAL

Sabe-se que a circulação da água de forma equilibrada é essencial para o equilíbrio e o funcionamento dos ecossistemas, seu desequilíbrio além de provocar problemas na saúde pública podem prejudicar o ciclo da água. Nesse sentido, é fundamental o monitoramento a fim de estabelecer um planejamento prévio para possíveis danos futuros. Como sabemos também, que no Brasil seus territórios são ricos em rios e afluentes, e a sua maior concentração localiza-se na Amazônia, a qual já é conhecida como a maior bacia hidrográfica e que tem como rio principal o rio Amazonas, possuindo mais de mil afluentes.

Contudo, devido a esse grande número de rios e afluentes há uma dificuldade de realização de técnicas para a implantação de sistemas relativos a outorgas e de informações locais, devido aos altos custos e precisaria de um período de tempo maior, causando um impedimento de monitoramento e fiscalização dos recursos.

Os estudos e o emprego de modelos hidrológicos para o monitoramento de bacias hidrográficas já vêm sendo aplicados em diferentes bacias hidrográficas no exterior e agora no Brasil, como forma de diminuição de custos, na tomada de decisão em pouco espaço de tempo, e o melhor, oferecendo respostas para amplas áreas não monitoradas. Nesse sentido, esse estudo se propôs apresentar um modelo hidrológico semi-distribuído, que não precisa de grandes informações de entradas, o qual faz uso de dados que podem ser tratados em uma plataforma SIG, bem como pode trabalhar com parcerias com outros órgãos que já fazem o monitoramento das informações necessárias para o seu funcionamento, como exemplo IBGE, EMBRAPA, INPE, entre outros.

Dentro desse contexto, os resultados da tese confirmaram que o uso do modelo pode auxiliar no planejamento dos recursos hídricos, bem como é capaz de simular a quantidade de água que é produzida na bacia, através do balanço hídrico, sendo possível relacionar com os diversos usos e cobertura do solo presentes no seu entorno e com isso dar uma resposta, quanto às alterações nela ocorridas.

Outro ponto interessante do modelo SWAT é a sua capacidade de projeção de cenários futuros, possibilitando um estudo antecipado de situações que podem vim prejudicar de alguma forma os recursos hídricos. Em que neste estudo foi possível verificar que a bacia do rio Apeú quando levada em consideração o uso do solo (i) respeitando a legislação do código florestal brasileiro de nº. 12.651/2012 ou (ii) considerando as áreas

de florestas sendo convertidas em área urbana, pudemos perceber que quando a bacia é colocada em teste (i) apresentou um aumento de 41% no escoamento subterrâneo, enquanto que o superficial apresentou uma diminuição de 51%. Já no segundo (ii) houve uma diminuição de 58% no escoamento subterrâneo, em compensação o escoamento superficial aumentou 21%, mostrando coerência nos resultados e eficácia do modelo SWAT para as análises voltadas para o monitoramento, gerenciamento e planejamento de bacias hidrográficas.

RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Recomenda-se, que sejam aplicadas metodologias que permitam uma análise conjunta e de interação das comunidades pelas necessidades evidenciadas neste trabalho e a urgência na busca de soluções para os problemas ambientais, como a realização de um diagnóstico da percepção das comunidades dentro dos diferentes cenários de uso do solo, para as questões relacionadas aos recursos hídricos e identificar o grau de entendimento e o envolvimento das escolas com o rio Apeú. Já que a escola é a mediadora no processo de implementação da Educação Ambiental para a sociedade, pois o diálogo é uma ferramenta necessária e de grande utilidade, entre professores e alunos, sendo um artifício que permite uma conexão entre diferentes, realidades baseadas numa perspectiva pedagógica com diálogos.

A educação ambiental pode ser uma ponte de reflexão e ação, que se desenvolve a partir de um processo educativo, permanente e contínuo tendo como objetivo, superar a visão meramente ecológica, transpondo o olhar para uma dimensão mais abrangente, com discussões de questões políticas, sociais, econômicas, culturais e ambientais. Conhecer a percepção ambiental do indivíduo é de grande importância para poder identificar e descrever alguns problemas ambientais, já que cada pessoa tem uma experiência única de percepção e que contribuição com o processo de gestão de recursos hídricos.

Outro fator de grande importância seria o levantamento de dados relacionados ao mapeamento mais detalhado das áreas dos diferentes usos do solo de modo a correlacioná-las com os problemas pontuais ao longo da bacia do rio Apeú, como o caso de lixos, a retirada da vegetação ripária, os despejos de esgotos, etc. Como resultado disso, poderia servir de instrumento de apoio associados às políticas públicas e com isso

obter atividades e programas ambientais com a participação das comunidades, reduzindo os danos e na maior conscientização dos moradores da bacia do rio Apeú.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. *et al.* **SWAT-CUP4**: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. 1. ed. Zurique: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 1997. p. 1879-1892.

ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.

ABBASPOUR, K. C. *et al.* Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, 2007.

ABBASPOUR, K. C. *et al.* **SWAT-CUP4**: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. 3. ed. Zurique: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2011, 324 p.

ABBASPOUR, K. C. *et al.* **SWAT-CUP4**: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. 4. ed. Zurique: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2013, p. 413-430.

ABBASPOUR, K. C. *et al.* **SWAT-CUP4**: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. 5 ed. Zurique: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2014, p. 733-752.

ABBASPOUR, K. C. *et al.* **SWAT-CUP4**: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. 6 ed. Zurique: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, 2015, p. 1-100.

ABREU, M. C.; TONELLO, K. C. Estimate of the water balance of the Sorocaba river watershed-SP. **AMBIÊNCIA**, Guarapuava, v. 11, n. 3, p. 513-527, 2015.

ADAM, K. N. *et al.* Mudanças climáticas e vazões extremas na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015.

AHN, J. M.; LEE, S.; KANG, T. Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum river. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 478, p. 103-115, 2014.

ALMEIDA, D. B. **Utilização de radar meteorológico e disdrômetro na previsão da vazão da bacia hidrográfica do rio Mundaú**. 2015. 64 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

ALMEIDA, C. A. *et al.* High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 46, n. 3, p. 291-302, 2016.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016**. Brasília, DF, 2016, 97 p.

ANDRADE, M. A.; DE MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 70-76, 2013.

ANDRADE, A. M. D. *et al.* Radiação fotossinteticamente ativa incidente e refletida acima e abaixo do dossel de floresta de mata atlântica em Coruripe, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 1, p. 68-79, 2014.

ANESI, H. D. **Influência do preenchimento de falhas de dados horários de precipitação por redes neurais artificiais (RNAS) na simulação hidrológica de base física em uma bacia rural**. 2014. 123 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Caracterização do meio físico da bacia do arroio Boa Vista-Guaramiranga (PR). **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 8, n. 21, p. 46-58, 2007.

ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. **Journal of the American Water Resources Association**, Texas, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological Processes: An International Journal**, Reino Unido, v. 19, n. 3, p. 563-572, 2005.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 486, p. 100-111, 2013.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009, 495 p.

BARROS, N. S; BRITTO, A. L; XIMENES, J. Alterações da dinâmica hídrica na formação espacial urbana da bacia do Paracuri, Belém-PA. *In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO – ENANPARQ*, 4., 2016, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PROPAP/UFRGS, 2016, p.1-17.

BLAINSKI, É.; ACOSTA, E.; DO PRADO, P. C. N. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 226-237, 2017.

BENINI, S. M.; DE GODOY ROSIN, J. A. R. Dinâmica fluvial no espaço urbano: aspectos relevantes. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, Tupã, v. 5, n. 31, p. 54-67, 2017.

BONUMÁ, N. B. *et al.* Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the eco hydrological swat model in brazilian watersheds and river basins. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 241-290, 2015.

BOURAOUI, F. *et al.* A distributed physical approach for surface-subsurface water transport modeling in agricultural watersheds. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 203, n. 1-4, p. 79-92, 1997.

BRASIL. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário [da] República Federativa do Brasil**, Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; (...) e dão outras providências, Brasília, DF, 25 mai. 2012, nº. 102, Seção 1, p.1-8.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B. I.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

CAMPOS, S. *et al.* Geoprocessamento aplicado na caracterização morfométrica da microbacia do ribeirão descaldado–Botucatu, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 52-65, 2018.

CARDOSO, C. A. *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

CARVALHO, A. P.; RODRIGUES, M. A. N. Percepção ambiental dos moradores do entorno do açude soledade no estado da Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 25-35, 2015.

CENSO, Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 67, n. 6, p. 1184-1202, 2015.

COUTINHO, A. C. *et al.* **Uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal**: TerraClass 2008. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária - Livro científico (ALICE), 2013, 110 p.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M.. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

DA LUZ, T. E. *et al.* Morfopedologia aplicada à concepção de obras em microbacia do perímetro urbano de Várzea Grande-MT. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 10, n. 3, p. 646-659, 2015.

DA SILVA FARIAS, V. D. *et al.* Produção de área foliar e biomassa e produtividade do feijão-caupi sob regimes hídricos em Castanhal, Pará. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 748-759, 2017.

DA SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento e análise ambiental: Aplicações. *In*: DA SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento e análise ambiental**. 1. ed. Lisboa: Bertrand, 2004, cap. 1-3.

DA SILVA, L. O.; DE ALMEIDA, E. A. Environmental perception and feeling belonging in environmental protection area coastal in northeastern of Brazil. **REMEA - Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, Rio Grande do Sul, v. 33, n. 1, p. 192-212, 2016.

DA SILVA, N. D. M.; CHRISTOFARO, C. Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, p. 31-39, 2017.

DA SILVA, R. M. *et al.* Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Amsterdam, v. 185, n. 11, p. 8977-8990, 2013.

DA SILVA, R. M.; HENRIQUE, I. G. N.; CAZÉ, J. F. Simulação das mudanças de uso e ocupação do solo e seus efeitos nas características hidrossedimentológicas em uma bacia do bioma caatinga. **Revista de Geografia**, Recife, v. 35, n. 1, p. 158-179, 2018.

DE ALMEIDA, A. S.; VIEIRA, I. C. G. Conflitos no uso da terra em áreas de preservação permanente em um polo de produção de biodiesel no estado do Pará. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 9, n. 3, p. 476-487, 2014.

DE ALMEIDA BRESSIANI, D. *et al.* Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, China, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

DE ANDRADE, C. W. L. *et al.* Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Pernambuco, v. 2, n. 3, p. 239-248, 2017.

DE BARROS, A. B.; DE BARROS, A. M. A. A difícil aplicabilidade da política de águas no Brasil. **InterSciencePlace**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 7, p. 1-22, 2015.

DE CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

DE FREITAS PEREIRA, B. W. *et al.* Uso da terra e degradação na qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Peixe-Boi, PA, Brasil. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 472-485, 2016.

DE OLIVEIRA BUENO, E. *et al.* Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica. **Scientia Agraria**, Paraná, v. 18, n. 2, p. 114-125, 2017.

DE MEDEIROS, I. C.; DA SILVA, R. M. Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG. **Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 457-471, 2014.

DERAEDT, D. *et al.* Représentation du couvert forestier dans la modélisation hydrologique: comparaison de dix modèles (synthèse bibliographique). **Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement**, Bélgica, v. 18, n. 1, p. 83-96, 2014.

DE SOUSA, F. R. C. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Tapuio (Ceará-Brasil). **Revista de Geociências do Nordeste**, Rio Grande do Norte, v. 2, p. 555-564, 2016.

DILE, Y. T. *et al.* Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 85, p. 129-138, 2016.

DORIGUEL, F.; CAMPOS, S.; DELMANTO JUNIOR, O. Caracterização morfométrica da microbacia do córrego Maria Pires, Santa Maria da Serra, Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 4, p. 372-377, 2015.

DOS SANTOS, C. A. C. *et al.* Obtenção do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia através do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 3, p. 420-432, 2014.

EASTON, Z. M. *et al.* Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 348, n. 3-4, p. 279-291, 2008.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M.; RAMOS, M.; COLLISCHONN, W. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 914-926, 2015.

FELIZARDO, L. M. **Aplicação de sistema de informações geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma micro-bacia urbana**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

FERRAZ, F. F. de B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 14, p. 45-56, 1999.

FERREIRA, R. S; UAGODA, R. E. S. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.10, n.3, p. 880-893, 2017.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. 2015. 186 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

FERNANDES, L. E. **Ajuste de coeficientes integrantes de processos físicos e bioquímicos na autodepuração em curso de água de médio porte**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

FENNER, W. *et al.* Análise do balanço hídrico mensal para regiões de transição de Cerrado-Floresta e Pantanal, estado de Mato Grosso. **Acta Iguazu**, Paraná, v. 3, n. 1, p. 72-85, 2014.

FERREIRA, João Carlos Vicente. **O Pará e seus municípios**. Belém: JC. V Ferreira, 2003, 10 p.

FERRIGO, S. *et al.* Avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas e do uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacia hidrográfica no Distrito Federal. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS*, 11., 2014, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBS, 2014. p. 1-15.

FRANCO, A. C. L; OLIVEIRA, D. Y; BONUMÁ, N. B. Transferência espaço-temporal de parâmetros no modelo SWAT. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.

FREITAS, M. I. A.; ABÍLIO, F. J. P. Percepção ambiental no contexto da gestão participativa dos recursos hídricos: concepções e perspectivas no sertão paraibano. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, Rio Grande do Sul, v. 28, p. 357-373, 2012.

FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS DO PARÁ/FAPESPA. **Estatísticas municipais paraenses**. Belém, 2016. p. 10-90.

GALHARTE, C. A.; VILLELA, J. M.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - Agriambi**, Campina Grande, v. 18, n. 2, p. 194-201, 2014.

GARBOSSA, L. H. P. *et al.* Potencial de uso do modelo hidrológico de base física na avaliação da legislação ambiental e seus impactos nos cenários hidrológicos. *In: COMASSETO, 5.*, 2013. **Anais de Pesquisas em Recursos Hídricos na Bacia do Rio Jacutinga e Sub-bacias Contíguas...** Concórdia: FUnc, 2013. p. 21-45.

GASSMAN, P. W. *et al.* The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 43, n. 1, p. 1-8, 2014.

GUEDES, J. A.; MAIA, J. L. Percepção ambiental dos recursos hídricos no município de Francisco Dantas, RN. **Sociedade e Território**, Natal, p. 90-106, 2011.

HOFFMANN, G. P.; NANNI, A. S. O uso da terra e sua influência sobre o volume das águas na bacia do rio Biguaçu/SC. **Geosul**, Santa Catarina, v. 32, n. 63, p. 97-117, 2017.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A. Restauração de ecossistemas e a produção de água. **Revista Hoehnea**, São Paulo, v. 44, n. 3, p. 315-327, 2017.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Pedológico 2015**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=150140>>. Acesso em: 15 out. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Banco de dados do programa de monitoramento da Amazônia por satélite – PRODES, 2010**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>>. Acesso em: 16 out. 2018.

ISO. **ISO 748: Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current meters or floats**. England: Technical Committee, 2007. p. 1-46.

KARMANN, I. *et al.* Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. *In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FARCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (org.)*. **Decifrando a terra**. São Paulo: [s.n.], 2000, p. 113-138.

KUHNLE, R. A. *et al.* Effects of land use changes on sediment transport in Goodwin Creek. **Water Resources Research**, Madison, v. 32, n. 10, p. 3189-3196, 1996.

KUWAJIMA, J. I. *et al.* Proposta da aplicação do modelo SWAT como ferramenta complementar de gerenciamento de recursos hídricos e estimativa de assoreamento em reservatórios. *In: WORLD WATER CONGRESS*, 14., 2011, Recife. **Anais...** Recife: IWRA, 2011, p. 134.

JESUS, A. A. S. **Geoprocessamento aplicado à estimativa de perda de solos por erosão laminar na bacia hidrográfica do rio Apeú (Nordeste do Pará) – Amazônia Oriental**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestre em Ciências Agrônomicas), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2009.

LELIS, T. A. *et al.* Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: simulação de cenários. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011.

LIMA, J.; LIMA, I. Conceitos básicos de hidrologia. *In: LIMA, J. (org.). Hidrologia urbana: conceitos básicos*. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, 2010. p. 143-175.

LÖBLER, C. A. **Análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, RS**. 2013. 53 f. Monografia (Grau de Bacharel em Geografia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; TONELLO, K. C. Escoamento superficial da água da chuva em um fragmento florestal de Mata Atlântica, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 51-58, jul. 2015.

MAGANO, D. A.; MENEGAES, J. F.; MACHADO, M. R. R. Modelagem de diferentes cenários utilizando o software openlisem na bacia hidrográfica de Arvorezinha/RS. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 18, n. 1, p. 48-64, 2016.

MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. M. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em córregos. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 402-412, 2015.

MAMÉDIO, F. M. P. **Impacto de erros nos dados de entrada na eficiência de um modelo hidrológico**. 2014. 261 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, L. C. **Vazão máxima em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia – MG**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MENDES, D. L. **Cálculo da recarga do aquífero Querença-Silves: aplicabilidade do modelo SWAT a bacias hidrográficas sobre aquíferos cárscicos**. 2010. 125 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia do Ambiente), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; DA ROCHA, E. J. P. O uso da estatística para regionalização da precipitação no estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 16, p. 64-71, 2015.

METCALFE, P.; BEVEN, K.; FREER, J. Dynamic TOPMODEL: A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps. **Environmental Modelling & Software**, Reino Unido, v. 72, p. 155-172, 2015.

MORAES FILHO, R. H. de. **Distrito de Apeú: análise e síntese dos impactos ambientais: um estudo de caso na microbacia hidrográfica do igarapé Apeú**. 2013. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental), Faculdade do Pará (FAP), Castanhal, 2013.

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

MORIASI, D. N. *et al.* Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 55, n. 4, p. 1241-1247, 2012.

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

MONTAÑO, M.; DE SOUZA, M. P. Integração entre planejamento do uso do solo e de recursos hídricos: a disponibilidade hídrica como critério para a localização de empreendimentos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 489-495, 2016.

NARSIMLU, B. *et al.* SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari river basin, India, using sequential uncertainty fitting. **Environmental Processes**, India, v. 2, n. 1, p. 79-95, 2015.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I, a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. Texas Water Resources Institute, Texas, 2011, P. 260.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005**, Blackland Research Center, Texas, p. 1494, 2005.

NIU, S. Q.; KNOUFT, J. H. Hydrologic characteristics, food resource abundance, and spatial variation in stream assemblages. **Ecohydrology**, Paris, v. 10, n. 1, p. 1770, 2017.

NUNES, G. **Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade da água da bacia do Lago Paranoá – DF**. 2016. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 2016.

NUNES, H. G. G. C. **Modelagem hidrológica na bacia do rio Capim – estado do Pará**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém/PA. 2013.

OLIVEIRA, F. M.; NUNES, T. S. Aplicação de protocolo de avaliação rápida para caracterização da qualidade ambiental do manancial de captação (Rio Pequeno) do município de Linhares, ES. **Natureza on line**, Santa Teresa, v. 13, n. 2, p. 86-91, 2015.

PANIZZA, A. de C. **A importância da mata ciliar**: entenda por que as formações vegetais ciliares são essenciais para os ecossistemas e para os recursos hídricos. São Paulo: [s.n.]. 2016. 33 p. Disponível em: <<http://www.cartaeducação.com.br/aulas/a-importância-da-mata-ciliar>>. Acesso em: 08 abr. 2017.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia-SC. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 859-869, 2013.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

PEREIRA, B.W. L. *et al.* Fragmentação da vegetação arbórea na bacia hidrográfica do Rio Apeú, nordeste do estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 55, n. 4, p. 297-305, 2012.

PINHEIRO, A. G. *et al.* Eficiência da cobertura vegetal na redução das perdas de água e solo no município de Iguatu. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 133-142, 2018.

PONTES, P. R. M *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.

PORTO, M. **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudos avançados. São Paulo: [s.n.], 2008, 60 p.

ROCHA, A. A.; VIANNA, P. C. G. A bacia hidrográfica como unidade de gestão da água. *In*: SEMINÁRIO LUSO-BRASILEIRO, AGRICULTURA FAMILIAR E DESERTIFICAÇÃO, 1., 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2006. p. 26-28.

RODRIGUES, S. A.; BATISTELA, G. C. Uma revisão sobre a disponibilidade hídrica brasileira para geração de energia elétrica? **Geoambiente on-line**, Jataí, n. 21, p. 48-52, 2013.

SABZEVARI, T. *et al.* Watersheds flood forecasting using HEC-GeoHMS and HEC-HMS model. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND DEVELOPMENT*, 2., 2010, Singapura. **Proceedings...** Liverpool: World Academic Union (World Academic Press), 2010. p. 323-327.

SANTOS, S. *et al.* Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. *In: CONGRESSO NACIONAL DE TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*, 12., Granada. **Anais...** Granada: [s.n.], 2006. p. 465-479.

SANTOS, G. V. et al. Análise hidrológica e socioambiental da bacia hidrográfica do córrego Romão dos Reis, Viçosa-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 931-940, 2007.

SANTOS, E. H. M.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 827-834, 2010.

SANTOS, R. M. **Padrão temporal e espacial das mudanças de usos da terra e cenários para a conservação da biodiversidade regional do município de São Félix do Araguaia, MT.** 2011. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas), Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2011.

SANTOS, J. C. **Análise da cobertura da terra da bacia hidrográfica do ribeirão água fria, no município de Palmas - TO, com ênfase nas áreas de preservação permanentes marginais.** 2016. 78 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

SANTOS, J. T. S. dos *et al.* O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: Um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA. **REGA**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 1-13, 2018.

SCHNEIDER, R. M. *et al.* Estudo da influência do uso e ocupação de solo na qualidade da água de dois córregos da bacia hidrográfica do rio Pirapó. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 295-303, 2011.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE. **Cadastro Ambiental Rural – CAR.** Belém, PA, 2018. 60 p. Disponível em: <<http://car.semas.pa.gov.br/#!/consulta/mapa>>. Acesso em: 20 de mar. 2019.

SOUSA, A. M. L. **Estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação na modelagem hidrológica.** 2010. 128 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUZA, S. R. de. **Dinâmica da paisagem da bacia hidrográfica do rio Apeú, Nordeste do Pará, Brasil.** 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, B. F. de *et al.* Avaliação da qualidade dos corpos hídricos frente às ações antrópicas no município de Santa Lúcia – SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.10, n. 1, p. 1-15, 2017.

SILVEIRA, A. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica, em hidrologia ciência e aplicação. *In*: TUCCI, C. E. M de (org.). **Hidrologia Aplicada**. Porto Alegre: Coleção ABRH, 2001. p. 10-120.

SIQUEIRA, N. M.; CASTRO, S. S.; FARIAS, K. M. S. Geografia e ecologia da paisagem: pontos para discussão. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 25, n. 3, p. 557-566, 2013.

SOLOS, Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. p. 4-20.

SMITH JUNIOR, F. P. **Imigração espanhola na Amazônia: As colônias agrícolas e o desenvolvimento socioeconômico no nordeste paraense (1890-1920)**. 2012. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências Socioambiental) - Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Lisboa, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TARGA, M. S. *et al.* Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012.

TAMBOSI, L. R. *et al.* Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o código florestal. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 29, n. 84, p. 151-162, 2015.

TEODORO, V. L. I. *et al.* O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, Araraquara, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007.

TENÓRIO, A. R. M. *et al.* **Mapeamento dos solos da estação de piscicultura de Castanhal**. 1. ed. Belém: FCAP, 1999. p. 2515-2526.

TESHAGER, A. D. *et al.* Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit HRU's. **Environmental management**, Suíça, v. 57, n. 4, p. 894-911, 2016.

TONELLO, K. C. *et al.* Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhanes-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TUCCI, C. E. M *et al.* **Modelos hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1998, 669 p.

TUCCI, C. E. M. *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: [s.n.], 2009, 944 p.

US Army Corps of Engineers River Analysis System - USACE.ECRAS. **Reference Manual**. 1 ed. Califórnia: Hydrologic Engineering Center, 2010. 411 p. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>>. Acesso em: 10 de fev. 2019.

VALE, J. R. B.; BORDALO, C. A. L.; DA FONSECA, L. C. N. Análise do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Apeú, nordeste paraense, entre os anos de 1999 e 2014. **Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Pará**, Belém, v. 2, n. 2, p. 76-83, 2016.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. **Water Science and Technology**, Londres, v. 53, n. 1, p. 51-59, 2006.

VAN LIEW, M. W. *et al.* Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrology**, Connecticut, v. 12, p. 173-189, 2007.

VARGAS, J. R. A.; FERREIRA JÚNIOR, P. D. Aplicação de um protocolo de avaliação rápida na caracterização da qualidade ambiental de duas microbacias do rio Guandu, Afonso Cláudio, ES. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 161-168, 2012.

VEIGA, A. M. **Calibração do modelo hidrossedimentológico SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia – GO**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

VEIGA, A. M.; OLIVEIRA, W. N.; SIQUEIRA, R. V. Utilização de dados espaciais para estimativa de vazão do Ribeirão da Posse no município de Guapó – Goiás. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 3812-3819.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. *In*: VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1975, p. 1-293.

WANG, X. *et al.* Simulation of land use–soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. **Ecological Engineering**, Praga, v. 36, n. 3, p. 328-344, 2010.

WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v. 12, n. 1, p. 100-103, 1969.

WINCHELL, M. *et al.* ArcSWAT Interface for Swat 2012. *In*: WINCHELL, M. **ArcSWAT: user guider**. 3 ed. Texas: Blackland Research Center, 2013. p. 884-862.

ZANATA, M. *et al.* Effect of soil use on the quality of water resource in watershed using multivariate statistical analysis. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 4, p. 776-789, 2015.