

FERNANDA SOUSA DOS SANTOS NODA

**AVALIAÇÃO DO MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL
(SWAT) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO TAQUARUÇU.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Gestão dos Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Fernán Enrique V. Figueroa

Palmas

2018

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

N761a Noda, Fernanda Sousa dos Santos.

Avaliação do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu. / Fernanda Sousa dos Santos Noda. – Palmas, TO, 2018.

115 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2018.

Orientador: Fernán Enrique Vergara Figueroa

1. Modelo hidrológico. 2. Análise de sensibilidade. 3. SWAT. 4. Bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu. I. Título

CDD 628

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

FERNANDA SOUSA DOS SANTOS NODA

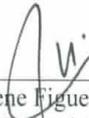
AVALIAÇÃO DO MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO TAQUARUÇU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernán Enrique Vergara Figueroa
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



Prof. Dr. Gírlene Figueiredo Maciel
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. Dirceu da Silveira Reis Júnior
Universidade de Brasília

Aprovada em: 18 de abril de 2018
Local de defesa: sala 301 do bloco J
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

Dedico aos meus pais, ao meu esposo, filhos e
sogros

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pelas bênçãos recebidas e pela oportunidade de realizar este sonho.

Ao Professor Dr. Fernán pela confiança, apoio e diversos ensinamentos.

Ao corpo Docente do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental por todo o conhecimento repassado (em especial ao Prof. Dr. Gírlene) e ao secretário do curso, Cristiano, por todo o apoio prestado.

Aos meus pais, Rubens dos Santos e Alba Valéria, por toda a educação que me proporcionaram e que possibilitou mais esta etapa na minha formação.

Ao meu amigo, companheiro e esposo Diogo Akyra que se fez presente em todas as fases desta empreitada, sem o seu apoio não teria sido possível.

À minha filha, Aurora Tie, que iluminou minha vida com risos, amor puro e gratuito.

A um pequeno anjinho que rapidamente se fez presente entre nós, nunca te esquecerei.

Aos meus sogros, Hetto Noda e Dina Noda, por cuidarem de mim e de nossa pequena menina.

Aos meus amigos de vida e irmãos de coração (Fátima, Marcelo e Ronaldo) que são fontes de inspiração. Aos amigos de décadas, Lucas e Vinícius, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas de curso, principalmente ao Dener Alves e Monnalisa de Cesaro que se tornaram grandes companheiros e apoiadores nesta jornada.

Ao grupo de amigos carinhosamente intitulado como “Quinta série” pela disponibilização de guarida e acolhimento.

À ANA, ao INMET e à BRK Ambiental pela disponibilização dos dados.

E a todos que de alguma forma (direta ou indiretamente) cooperaram para o prosseguimento e desenvolvimento deste estudo.

*“A Matemática é a única linguagem que
temos em comum com a natureza.”*

Stephen Hawking

RESUMO

Devido ao processo de crescimento das cidades e atividade agrícolas há impactos que afetam os recursos hídricos como a escassez, degradação da qualidade de água e consequente conflitos de usos. Neste contexto, os modelos hidrológicos são importantes ferramentas para avaliar o comportamento hídrico de bacias hidrográficas, além de também poderem ser utilizados na previsão de cenários a fim de verificar o impacto do uso e ocupação do solo. Assim, o presente estudo teve como finalidade avaliar o desempenho do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) na simulação da vazão na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu. A calibração automática foi realizada com o programa SWAT-CUP, em passo diário, com dados de duas estações fluviométricas da BRK Ambiental no período de abril de 2013 a julho de 2014, enquanto os dados de agosto de 2014 a agosto de 2015 foram utilizados no período de validação. A análise de sensibilidade foi realizada com 14 parâmetros selecionados entre aqueles mais significativos para a simulação de vazão em região do bioma Cerrado. Os resultados da análise de sensibilidade indicaram que os parâmetros mais influentes são o SOL_K (condutividade hidráulica saturada do solo) e CN2 (curva número para a condição II). Para avaliação do desempenho do modelo foram utilizadas as funções objetivos Nash-Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2) que indicaram, no período de calibração, os seguintes valores: -0,05 e 0,55 (sub-bacia 1); 0,51 (sub-bacia 3), respectivamente. Já no período de validação foram apresentados os seguintes resultados para NSE e R^2 : 0,44 e 0,54 (sub-bacia 1); 0,24 e 0,29 (sub-bacia 3), nesta ordem. Considerando que o objeto de estudo é importante por ser responsável por grande parte do abastecimento de água do município de Palmas – TO e que o *software* não conseguiu simular de forma adequada as vazões mínimas, os resultados são considerados insatisfatórios.

Palavras-chave: Modelo hidrológico, análise de sensibilidade, SWAT e Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.

ABSTRACT

Due to the process of city growth and agricultural activity there are impacts that affect water resources such as scarcity, degradation of water quality and consequent conflicts of uses. In this context, hydrological models are important tools to evaluate the hydrological behavior of watersheds, and can also be used to predict scenarios to verify the impact of land use and occupation. Thus, the present study had as purpose to evaluate the performance of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in the flow simulation in the Ribeirão Taquaruçu Watershed. The automatic calibration was performed with the SWAT-CUP program, in a daily step, with data from two BRK Ambiental fluviometric stations from April 2013 to July 2014, while data from August 2014 to August 2015 were used in the period of validation. The sensitivity analysis was performed with 14 parameters chosen considering the most significant ones for the simulation of flow in the Cerrado region. The results of the sensitivity analysis indicated that the most influential parameters are the SOL_K (saturated hydraulic conductivity of the soil) and CN2 (number curve for condition II). The Nash-Sutcliffe objective functions (NSE) and the determination coefficient (R^2) were used to evaluate the performance of the model, which indicated, in the calibration period, the following values: - 0.05 and 0.55 (sub-basin 1); 0.51 (sub-basin 3), respectively. In the validation period, the following results were presented for NSE and R^2 : 0,44 and 0,54 (sub-basin 1); 0.24 and 0.29 (sub-basin 3), in that order. Considering that the object of study is important because it is responsible for a large part of the water supply of the municipality of Palmas – TO and that the software was not able to simulate the minimum flows adequately, the results are considered unsatisfactory.

Keywords: Hydrological model, sensitivity analysis, SWAT and Watershed of Ribeirão Taquaruçu.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico.....	25
Figura 2 – Esquema da história de desenvolvimento do SWAT e suas adaptações	33
Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu	36
Figura 4 – Mapa de declividade da bacia	37
Figura 5 – Mapa geológico.....	38
Figura 6 – Mapa pedológico.....	40
Figura 7 – “Loop” do Comando para o cálculo do balanço hídrico	43
Figura 8 – Relação de escoamento superficial e da precipitação (SCS <i>Curve Number</i>).....	46
Figura 9 – Comparação da distribuição de umidade (Green & Ampt e distribuição observada)	48
Figura 10 – Distribuição da demanda evaporativa do solo com profundidade	54
Figura 11 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas.....	63
Figura 12 – Localização das estações fluviométricas.....	67
Figura 13 – Fluxograma metodológico do trabalho	68
Figura 14 – Modelo Digital de Elevação gerado.....	75
Figura 15 – Mapa pedológico (reclassificado).....	76
Figura 16 – Mapa de cobertura e uso do solo.....	77
Figura 17 – Precipitação total (médias mensais).....	78
Figura 18 – Precipitação total anual	79
Figura 19 – Médias mensais de temperatura máxima e mínima	79
Figura 20 – Médias mensais de umidade relativa do ar	80
Figura 21 – Médias mensais de radiação solar.....	80
Figura 22 – Médias mensais de velocidade do vento	81
Figura 23 – Sub-bacias do objeto de estudo.....	82
Figura 24 – Vazão simulada e observada sem calibração, sub-bacia 1	84
Figura 25 – Vazão simulada e observada sem calibração, sub-bacia 3	84
Figura 26 – Diagrama de dispersão da simulação inicial para a sub-bacia 1	85
Figura 27 – Diagrama de dispersão da simulação inicial para a sub-bacia 3	85
Figura 28 – Resultado da análise de sensibilidade	87
Figura 29 – Gráficos de dispersão, valor do parâmetro versus função objetivo (NSE).....	88
Figura 30 – Vazão simulada e observada após calibração, sub-bacia 1	90
Figura 31 – Vazão simulada e observada após calibração, sub-bacia 3	90
Figura 32 – Diagrama de dispersão após calibração, sub-bacia 1	91

Figura 33 – Diagrama de dispersão após calibração, sub-bacia 3	91
Figura 34 – Vazão simulada e observada no período de validação, sub-bacia 1	93
Figura 35 – Vazão simulada e observada no período de validação, sub-bacia 3	94
Figura 36 – Diagrama de dispersão no período de validação, sub-bacia 1	94
Figura 37 – Diagrama de dispersão no período de validação, sub-bacia 3	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Melhorias realizadas no modelo ao longo do tempo.....	33
Quadro 2 – Características dos grupos hidrológicos.....	47
Quadro 3 – Relação dos dados de entrada para modelagem no SWAT.....	59
Quadro 4 – Dados das estações meteorológicas convencionais do INMET.....	62
Quadro 5 – Informações sobre as estações pluviométricas da ANA.....	62
Quadro 6 – Parâmetros requeridos pelo modelo SWAT.....	64
Quadro 7 – Dados de solos exigidos pelo modelo.....	66
Quadro 8 – Informações sobre as estações fluviométricas para calibração do modelo.....	66
Quadro 9 – Relação dos períodos de dados na fase de processamento e pós-processamento	73
Quadro 10 – Cobertura e uso do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.....	76
Quadro 11 – Valores de CN2 adaptados de Sartori (2004).....	77
Quadro 12 – Descrição da alteração dos valores dos parâmetros no processo de calibração	86
Quadro 13 – Parâmetros, valor e métodos utilizados no processo de calibração.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices morfométricos da Bacia do Ribeirão Taquaruçu	41
Tabela 2 – Sub-bacias geradas e suas respectivas URHs.....	82
Tabela 3 – Resultados das funções objetivos na simulação inicial.....	83
Tabela 4 – Parâmetros e respectivos valores de t-Stat e P-Value	87
Tabela 5 – Comparação dos resultados das funções objetivos	92

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

- AGNPS - *Agricultural NonPoint Source Pollution Model*
- AGRC - *Agricultural Land-Close-grown*
- ALPHA_BF - Fator alfa do fluxo de base
- ANA - Agência Nacional de Águas
- ANION_EXCL - Fração de porosidade – espaços vazios
- AnnAGNPS - *Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model*
- ANSWERS - *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*
- ANSWERS-Continuous - *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Continuous*
- APA - Área de Proteção Ambiental
- ARS - *Agricultural Researchs Services*
- BARR - *Barren*
- BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
- CASC2D - *Cascade of planes in 2-Dimensions*
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
- CLAY - Porcentagem de argila no solo
- CN2 - Curva Número para a condição II
- COEA - Índice de Nash-Sutcliffe alterado
- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
- CREAMS - *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System*
- DEEPST - Altura inicial da água no aquífero profundo
- DWSM - *Dynamic Watershed Simulation Model*
- EPIC - *Erosion-Productivity Impact Calculator*
- ESCO - Fator de compensação de evaporação do solo
- ESRI - *Environmental Systems Research Institute*
- ETA - Estação de Tratamento de Água
- ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
- FAO - *Food and Agriculture Organization*
- FRSD - *Forest-Deciduous*
- FRST - *Forest-Mixed*
- GLEAMS - *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*
- GLUE - *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*
- GW_DELAY - Intervalo de tempo para recarga do aquífero
- GWHT - Altura inicial da água subterrânea

GWQMN - Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer

GW_REVAP - Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada

HEC-HMS - *Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System*

HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas

HSPF - *Hydrologic Simulation Program-Fortran*

HYDGRP - Grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C ou D)

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

KINEROS - *Kinematic Erosion Model*

MCMC - *Markov Chain Monte Carlo*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MIKE SHE - *European Hydrological System Model*

MMA - Ministério do Meio Ambiente

NLAYERS - Número de *layers* de informação (número de horizontes)

NSE - *Nash-Sutcliffe Efficiency*

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ONU – Organização das Nações Unidas

PARASOL - *Parameter Solutions*

PAST - *Pasture*

PBIAS - Percentual de tendência

PERH-TO - Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

PRMS - *Precipitation-Runoff Modeling System*

PSO - *Particle Swarm Optimization*

R²- Coeficiente de determinação

REVAPMN - Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada

RNGB - *Range-Brush*

RNGE - *Range-Grasses*

ROCK - Porcentagem de cascalho no solo

ROTO - *Routing Outputs to Outlet*

RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural

RSR - Razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações

SAND - Porcentagem de areia no solo

SEPLAN - Secretaria de Planejamento e Orçamento do Estado do Tocantins

SHALLST - Altura inicial da água no aquífero raso

SHE - *System Hydrologic Europe*

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SILT - Porcentagem de silte no solo

SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SOL_ALB - Albedo do solo

SOL_AWC - Capacidade de água disponível no solo

SOL_BD - Densidade aparente do solo

SOL_CBN - Conteúdo do carbono orgânico do solo

SOL_CRK - Potencial ou máximo volume de fissuras do perfil do solo

SOL_EC - Condutividade elétrica

SOL_K - Condutividade hidráulica saturada do solo

SOL_Z - Profundidade de cada horizonte

SOL_ZMX - Profundidade máxima do solo que a raiz alcança

SNAM - Classificação do solo (nome dado a cada classe).

SUF12 - *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm*

SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*

SWAT-CUP - *SWAT Calibration and Uncertainty Programs*

SWMM - *Storm Water Management Model*

SWRRB - *Simulator for Water Resources in Rural Basins*

TNC - *The Nature Conservancy*

TOPMODEL - *Topography-based hydrological model*

UFT - Universidade Federal do Tocantins

URHs - Unidades de Respostas Hidrológicas Múltiplas

URMD - *Residential-Medium Density*

USDA - *United States Department of Agriculture*

USLE_K - Fator de erodibilidade do solo

WATR - *Water*

WEPP - *Water Erosion Prediction Project*

WESP - *Watershed Erosion Simulation Program*

WXGEN - *Weather generator*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 GERAL	22
2.2 ESPECÍFICOS	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 CICLO HIDROLÓGICO	23
3.2 BACIA HIDROGRÁFICA	25
3.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	27
3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
4.1.1 Localização	36
4.1.2 Clima	36
4.1.3 Declividade	37
4.1.4 Geologia	37
4.1.5 Geomorfologia	39
4.1.6 Pedologia.....	39
4.1.7 Hidrografia	41
4.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	42
4.3 DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT.....	42
4.4 DADOS DE ENTRADA	59
4.4.1 Planos de Informação	59
4.4.2 Dados Tabulares	61
4.4.3 Parametrização dos Dados	67
4.5 APLICAÇÃO DO SWAT	68
4.5.1 Delineamento e Discretização da Bacia.....	69
4.5.2 Definição de Unidades de Respostas Hidrológicas.....	69
4.5.3 Definição do Período de Simulação.....	70
4.5.4 Simulação Inicial.....	70
4.5.5 Análise de Sensibilidade	71
4.5.6 Calibração e Validação	72
4.5.7 Análise de Desempenho do Modelo	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75

5.1 DADOS DE ENTRADA	75
5.1.1 Modelo Digital de Elevação – MDE.....	75
5.1.2 Pedologia.....	75
5.1.3 Cobertura e Uso do Solo	76
5.1.4 Dados Climáticos	78
5.2 APLICAÇÃO DO SWAT	81
5.3 AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO INICIAL.....	82
5.4 SELEÇÃO DE PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	85
5.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	89
5.6 VALIDAÇÃO DO MODELO	92
6 CONCLUSÕES.....	97
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
8 APÊNDICE.....	111
9 ANEXO	113

1 INTRODUÇÃO

É amplamente sabido que a água é um bem comum essencial à vida, Art. 225 da Constituição Federal (BRASIL, 1988), sendo um recurso ambiental (BRASIL, 1981) finito dotado de valor econômico (BRASIL, 1997) empregado em diversas atividades humanas o que implica em tendência de aumento na demanda de água e consequente diminuição em sua disponibilidade, além da possibilidade de degradação e poluição hídrica decorrente dos diversos tipos de usos e ocupação do solo.

Segundo Setti et al. (2001), o crescimento excessivo e a degradação da qualidade da água culminam em questões de escassez hídrica no Brasil devido a processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola desordenados. O Brasil possui 12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos embora a oferta não seja equitativa, como no caso da Amazônia que possui 74% dessa água e tem menos de 5% da população brasileira (BRASIL, 2007).

Com o intuito de combater o desequilíbrio hídrico e os conflitos de uso foi criada a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que concebeu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGREH) cuja responsabilidade é da Agência Nacional de Águas – ANA (Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000) e possui dentre os seus fundamentos: a) a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e b) a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos.

Silva (2003) explana que gestão de recursos hídricos é traçar linhas de ações contendo planejamentos voltados à solução de problemas no âmbito dos recursos hídricos, considerando questões ambientais, políticas, econômicas e sociais, ao mesmo tempo maximizando o aproveitamento de tal recurso e solucionando os conflitos de interesse de uso de água.

A Agência Nacional das Águas – ANA (2014, p.19) define gestão integrada de recursos hídricos:

Processo que promove, de forma coordenada, o desenvolvimento e a gestão dos recursos hídricos, do uso do solo e afins, com o objetivo de maximizar o bem-estar econômico e social sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas e do meio ambiente, em um cenário que contemple vontade política, instituições sólidas e uma abordagem técnica, econômica e social inclusiva.

Dentre as diretrizes gerais para a implementação da PNRH estão: I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade; II - a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País e III - a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental. Nesta conjuntura, Salles (2012) esclarece que

análises de sistemas hidrológicos se tornam indispensáveis para respaldar a tomada de decisões por formuladores de políticas públicas, na busca pela utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável e ao uso múltiplo das águas entre os diferentes usuários.

Entretanto, para obter uma gestão adequada dos recursos hídricos é necessária a utilização de bases de dados confiáveis, que são frequentemente insuficientes ou inexistentes. Nesse caso, uma alternativa é a aplicação de modelos matemáticos que possam estimar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (CASTRO, 2013).

Dooge (1968) definiu sistema como qualquer estrutura, procedimento, esquema, real ou abstrato que relaciona, em um determinado intervalo de tempo, uma causa ou estímulo com um efeito ou resposta. O início da modelagem hidrológica pode ser atribuído ao desenvolvimento da engenharia civil, no século 19, para a construção de estradas, canais, represas, galerias, pontes sistemas de drenagem, esgoto e de abastecimento de água. Na década de 60, com a revolução digital, foi possível a integração de processos e, conseqüentemente, simulações completas para toda uma bacia (SINGH E WOOLHISER, 2002).

Baldissera (2005) elucida que os modelos hidrológicos vêm sendo desenvolvidos para prognosticar o impacto do uso e ocupação do solo na qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas. Além disso, os modelos também têm sido utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas (MARINHO FILHO et al., 2012).

Dentre os diversos modelos hidrológicos concebidos, há o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) que permite um número de diferentes processos físicos serem simulados em bacias hidrográficas com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água. O modelo considera a bacia dividida em sub-bacias com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da bacia (BALDISSERA, 2005). É um programa que trabalha com uma interface vinculada a um *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), é um modelo de base física e computacionalmente eficiente (CASTRO, 2013).

Segundo Lima (2010), o bioma cerrado ocupa uma área correspondente a aproximadamente 24% do território brasileiro e desempenha papel fundamental na produção e distribuição de recursos hídricos para oito das doze regiões hidrográficas por se localizar na porção central do Brasil e em regiões de elevadas altitudes. O autor ainda afirma que desde a

década de 1970 esse ecossistema vem sendo ocupado de forma acelerada, com destaque para o crescimento dos centros urbanos e o desenvolvimento da agricultura.

Neste contexto encontra-se a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu, unidade de estudo deste trabalho, haja vista que a área está situada no bioma cerrado e vem sofrendo um processo de ocupação acentuado desde a criação de Palmas (PALMAS, 2014b). Chiesa (2016) afirma que a despeito da área da bacia apresentar considerável perturbação, a vegetação nativa ainda ocupa sua maior parcela de área (70,94%) enquanto as atividades agropecuárias ocupam 22,37% da área da bacia.

O uso múltiplo das águas no Tocantins é, historicamente, influenciado pelas frentes de desenvolvimento vigentes na década de 1960 e 1970 e políticas de interiorização do País resultando em: atividades agropecuárias, presença do sistema de produção familiar, abastecimento público, pequenas áreas irrigadas, mineração, novas vias de acesso (estradas e rodovias) e consequente maior intensificação de uso e ocupação humana (BESSA et al., 2011). Essa tendência, ainda hoje, é presente e pode ser observada no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (PERH-TO) que lista o abastecimento de água, indústria, pecuária, agricultura e mineração como os principais usos consuntivos do Estado (TOCANTINS, 2011).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu possui 461,39 km² de área (CHIESA, 2016), sendo integrante da Região Hidrográfica do Entorno do Lago da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães que possui um comitê instituído pelo Decreto nº 4.434, de 07 de novembro de 2011. Essa bacia é amplamente estudada, tanto pela Universidade Federal do Tocantins – UFT (SOUZA, 2006; BONATTO, 2008; PIRES, 2009; BRITO, 2012; CHIESA, 2016; COSTA, 2016) quanto por outras instituições (MARQUES, 2011; SILVA NETO, 2011; TNC, 2012) o que resulta em dados prévios bem fundamentados. Cabe citar que o Ribeirão Taquaruçu Grande se destaca por possuir uma das maiores bacias hidrográficas presentes na região do município Palmas (MAGALHÃES FILHO et al., 2012).

Para abastecer a cidade de Palmas é realizada a captação de água no Ribeirão Taquaruçu Grande que é responsável por 66% do abastecimento de água (SILVA NETO, 2011). O sistema de produção Ribeirão Taquaruçu (mais conhecido como Estação de Tratamento de Água 006, isto é, ETA 006 e principal unidade operacional), situa-se no Km 12 da Rodovia TO-050 (MAGALHÃES FILHO et al., 2012).

A captação de água da ETA 006 é feita a jusante da união dos Ribeirões Taquaruçuzinho e Taquaruçu Grande e possui vazão de captação 700 L/s que é responsável

por fornecer água para parte da área central de Palmas e a região sul – bairro Taquaralto e bairros Aurenny I, II e III (PALMAS, 2014a e PALMAS, 2014b). Cabe mencionar que nesta bacia há outro sistema de abastecimento denominado como ETA 007 responsável por abastecer o distrito de Taquaruçu com capacidade de vazão de 13 L/s (PALMAS, 2014b). Silva Neto (2011) frisa a importância desta bacia visto que é a principal fonte de captação de água para consumo humano do município de Palmas – TO.

Na área da bacia também ocorre o lançamento dos efluentes tratados proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da região sul de Palmas, conhecida como ETE Aurenny, cuja vazão de lançamento é de 30 L/s (PALMAS, 2014a), ressalta-se que todos os sistemas (de tratamento de água e de efluentes). Além dos usos supracitados, a área de estudo possui atividades recreativas já que o local concentra áreas de lazer e turismo pela existência de inúmeras cachoeiras e balneários (TOCANTINS, 2004).

Na foz da Bacia do Ribeirão Taquaruçu (a margem do lago da Usina Hidroelétrica Luiz Eduardo – UHE Lajeado) pode ser observada maior preponderância de área urbana haja vista que parte da cidade de Palmas encontra-se contida nesta bacia, além da área urbana relativa ao distrito de Taquaruçu. A referida bacia conta com uma variada ocupação e uso da terra, apresentando diferentes interesses econômicos e sociais, dentre eles a captação para abastecimento urbano e atividades agropastoris (BARROS, 2007). Segundo a *The Nature Conservancy* – TNC (2012), a bacia possui alto grau de preservação já que mais de 75% de sua área é caracterizada por coberturas naturais mesmo apresentando áreas antropizadas em função da agropecuária (21,92% que representa 87 km²) seguida por 2,10% (8,35 km²) devido a área urbanizada.

Na Bacia do Ribeirão Taquaruçu as vazões outorgadas por uso consuntivo ocorrem do seguinte modo: 95,3% é destinado para abastecimento, 0,1% dessedentação, 2,3% irrigação, 0,3% indústria, 1,1% piscicultura e 0,9% para serviços (TOCANTINS, 2015). Entretanto, sabe-se que vem ocorrendo diminuição da vazão do Ribeirão Taquaruçu Grande o que implica na oferta hídrica da bacia principalmente no período de estiagem – julho a setembro (SANEATINS, 2010 apud SILVA NETO, 2011).

Neste contexto, foi utilizado o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) a fim de avaliar se o *software* é capaz de simular adequadamente a vazão de modo a amparar nas tomadas de decisões no que tange ao gerenciamento e planejamento da Bacia do Ribeirão Taquaruçu tendo em vista que possui um dos principais corpos hídricos de abastecimento público do município de Palmas (o Ribeirão Taquaruçu Grande).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar se o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é capaz de simular adequadamente a vazão na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.

2.2 ESPECÍFICOS

1. Sistematizar um banco de dados de entrada que contemple: os planos de informação (modelo digital de elevação, tipos do solo e cobertura e uso do solo) e as séries históricas de precipitação, temperaturas (máximas e mínimas), radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento.
2. Realizar análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo computacional.
3. Avaliar o desempenho do modelo SWAT.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é o foco central da hidrologia. O ciclo não tem começo ou final e seus muitos processos ocorrem continuamente. Pode ser dividido em três subsistemas: o sistema de água atmosférica contendo os processos de precipitação, evaporação, intercepção e transpiração; o sistema de águas superficiais que contém os processos de escoamento terrestre, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e escoamento secundário para córregos e oceano; e o sistema de água subterrânea que combina os processos de infiltração, recarga de águas subterrâneas, fluxo subterrâneo e fluxo de águas subterrâneas (CHOW, 1988). Entretanto, é comum estudar com maior interesse a fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica (TUCCI, 2002).

Righetto (1998) denomina ciclo hidrológico como o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção e escoamento superficiais, infiltração, percolação da água no solo e nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes. Este ciclo é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera (TUCCI, 2002). A seguir é apresentada uma descrição geral do ciclo hidrológico, conforme Righetto (1998).

A precipitação, comumente em forma de chuva, ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico. Quando o vapor de água se transforma diretamente em cristais de gelo com tamanho e peso suficientes, a precipitação pode ocorrer na forma de neve ou granizo. No trajeto em direção à superfície terrestre a precipitação já sofre evaporação, sendo que em algumas regiões a evaporação pode ser tão significativa que a precipitação é totalmente vaporizada.

Ao cair sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado sofre intercepção em folhas e caules, de onde evapora. Quando se excede a capacidade de armazenar água na superfície dos vegetais, ou por ação dos ventos, a água interceptada pode-se reprecipitar para o solo. A água que atinge o solo segue diversos caminhos. Como o solo é um meio poroso, há infiltração de toda precipitação que chega ao solo, enquanto a superfície do solo não se satura. A partir do momento da saturação superficial, à medida que o solo vai sendo saturado a maiores profundidades, a infiltração decresce até uma taxa residual, com o

excesso não infiltrado da precipitação gerando escoamento superficial. A infiltração e a percolação no interior do solo são comandadas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade. A umidade do solo realimentada pela infiltração é aproveitada em parte pelos vegetais, que a absorvem pelas raízes e a devolvem, quase toda, à atmosfera por transpiração, na forma de vapor de água. O que os vegetais não aproveitam percola para o lençol freático que normalmente contribui para o escoamento de base dos rios.

O escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao micro relevo do solo. A erosão das partículas de solo pelos filetes em seus trajetos, aliada à topografia preexistente, molda, por sua vez, uma microrede de drenagem efêmera que converge para a rede de cursos de água mais estável, formada por arroios e rios. A presença de vegetação na superfície do solo contribui para dificultar o escoamento superficial, favorecendo a infiltração em percurso. A vegetação também reduz a energia cinética de impacto das gotas de chuva no solo, minimizando a erosão.

Com raras exceções, a água escoada pela rede de drenagem mais estável destina-se ao oceano. Nos oceanos a circulação das águas é regida por uma complexa combinação de fenômenos físicos e meteorológicos, destacando-se a rotação terrestre, os ventos de superfície, variação espacial e temporal da energia solar absorvida e as marés. Em qualquer tempo e local por onde circula a água na superfície terrestre, seja nos continentes ou nos oceanos, há evaporação para a atmosfera, fenômeno que fecha o ciclo hidrológico ora descrito. A evapotranspiração, que é a soma da evaporação e da transpiração de culturas e da vegetação natural, depende da radiação solar, das tensões de vapor do ar e dos ventos.

Todos os componentes sólidos, líquidos e gasosos são parte do ciclo dinâmico da água, cuja fase mais importante deste ciclo é o estado líquido, por ser o estado em que a água está disponível para pronta utilização. Os fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia térmica solar, a força dos ventos, que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e deslocamento das massas de água. Os principais componentes do ciclo hidrológico são a evaporação, a precipitação, a transpiração das plantas e a percolação, infiltração e drenagem (TUNDISI, 2003), conforme representa a Figura 1.

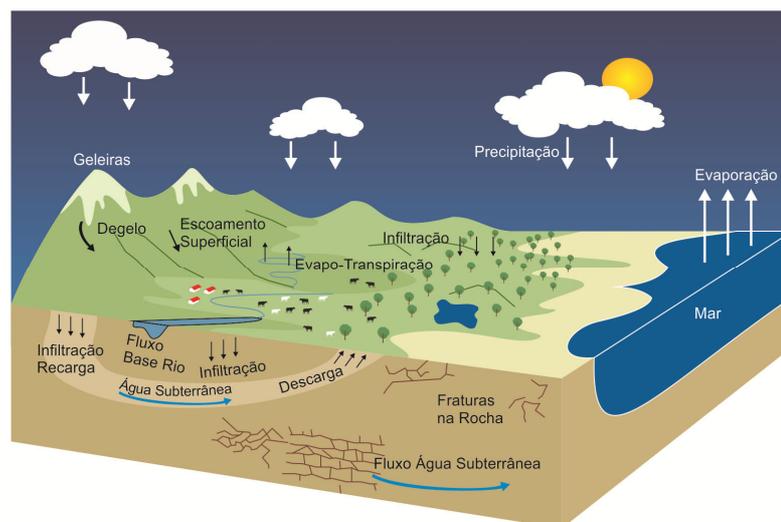


Figura 1 – Ciclo hidrológico
Fonte: Ministério do Meio Ambiente – MMA (2016)

Segundo Santana (2003), as áreas de infiltração são conhecidas como áreas de recarga que quando sofrem degradação ambiental provocada por desmatamentos desordenados, compactação e erosão de solos afeta o potencial de evapotranspiração (e consequentemente a produção de água limpa para o ciclo hidrológico) e provoca escoamentos superficiais excessivos que carregam sedimentos e dejetos que irão se depositar nos grandes reservatórios tendo como resultado o assoreamento e a poluição ambiental. Ainda de acordo com o mesmo autor, as consequências desses fenômenos (em médio e longo prazo) é o comprometimento da capacidade produtiva e de conservação de água e solo nas propriedades rurais, além da redução na capacidade de armazenamento dos grandes reservatórios o que compromete a produção de energia o que resulta na degradação das bacias hidrográficas.

3.2 BACIA HIDROGRÁFICA

Nas aplicações de engenharia hidrológica, toma-se um domínio local ou regional, onde geralmente se considera a bacia hidrográfica como sendo a área principal de estudo (RIGHETTO, 1998). Christofolletti (1981) define bacia hidrográfica como uma área drenada por um sistema fluvial, que pode ser considerada tanto um sistema aberto quanto fechado, onde toda matéria e energia presentes no sistema apresentam uma função própria e estão estruturados intrinsecamente entre si.

Tucci (2002) afirma que a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída (exutório), composta basicamente por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório. Podendo ser

considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e também os infiltrados profundamente.

A bacia hidrográfica é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial (SANTANA, 2003).

Em função de suas características naturais, as bacias hidrográficas têm se tornado importante unidade espacial utilizada para gerenciar atividades de uso e conservação dos recursos naturais, principalmente nas situações atuais de grande pressão sobre o ambiente em função do crescimento populacional e do desenvolvimento (SILVA et al., 2004).

Segundo Santos (2004) a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento é aceita universalmente, sendo utilizada porque constitui um sistema natural bem delimitado no espaço, composto por um conjunto de terras topograficamente drenadas por um curso d'água e seus afluentes, onde as interações são integradas e, por isso, mais facilmente interpretadas por *inputs* e *outputs* (entradas e saída de dados, respectivamente). O autor afirma que não há qualquer área de terra que não se integre a uma bacia hidrográfica e, por isso, quando o problema central é a água a solução deve estar estreitamente ligada ao seu manejo e manutenção.

A utilização de uma bacia hidrográfica como unidade de estudo permite pontuar os problemas facilitando a identificação de focos de degradação ambiental e o grau de comprometimento da produção sustentada. Assim, a bacia hidrográfica torna-se a unidade de trabalho ideal para o planejamento de exploração que contemple a integração de recursos naturais e aspectos socioeconômicos (SANTANA, 2003).

No Brasil a definição da bacia hidrográfica como unidade de trabalho foi trazida pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 001/1986, Artigo 5º, inciso III, que afirma: "... definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza". Para corroborar com o exposto a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) baseada em vários fundamentos, dentre eles, a afirmação de que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a execução da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

Em geral, a dimensão da bacia hidrográfica tem influência sobre os resultados de modo que bacias hidrográficas menores facilitam o planejamento por razões técnicas, (já que simplifica e efetiva a espacialização dos dados) e por razões estratégicas (por facilitar e garantir a participação popular e individualizar os problemas principais, que se tornam mais centralizados ou limitados). Assim, como artifício, pode-se subdividir uma bacia hidrográfica em unidades menores por definição, a priori, das potencialidades, fragilidades, acertos e conflitos centrados nas características da área. (SANTOS, 2004).

Segundo Porto & Porto (2008), a escala a ser utilizada depende do problema a ser solucionado, por isso se diz que o tamanho ideal de bacia hidrográfica é aquele que incorpora toda a problemática de interesse. Esse conceito sistêmico adapta-se muito bem aos sistemas de gestão de recursos hídricos.

3.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

À medida que a economia foi se tornando mais complexa e diversificada, mais usos foram sendo adicionados aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Com o aumento e diversificação da atividade econômica, a dependência dos recursos hídricos aumenta (especialmente em regiões com variabilidade anual grande no ciclo e áridas). Assim, as pressões sobre os usos dos recursos hídricos provêm de dois grandes problemas que são o crescimento das populações humanas e o grau de urbanização e aumento das necessidades para irrigação, e produção de alimentos (TUNDISI, 2003).

Quando há abundância de água, ela pode ser tratada como bem livre, sem valor econômico. Contudo, com o crescimento da demanda começam a surgir conflitos entre usos e usuários da água, a qual passa a ser escassa e, então, necessita ser gerida como bem econômico, devendo ser-lhe atribuído o justo valor. A escassez também pode decorrer devido a aspectos qualitativos, quando a poluição afeta de tal forma a qualidade da água que os valores excedem os padrões admissíveis para determinados usos (SETTI et al., 2001).

Para Righetto (1998) entende-se por escassez a restrição de disponibilidade de água para atender às várias demandas solicitadas, seja em quantidade ou em qualidade. Por isso, a água é um recurso tão importante que define o desenvolvimento que uma região, país ou sociedade pode alcançar (SETTI et al., 2001). Assim, para resolver as questões de escassez relativas aos recursos hídricos disponíveis em uma determinada região são necessários estudos, planejamento e ações que são componentes da gestão dos recursos hídricos (RIGHETTO, 1998).

Setti et al. (2001) explana que desde a década de 1930 o Brasil possui o Código de Águas (Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934), entretanto esse ordenamento jurídico não foi capaz de incorporar meios para combater o desconforto hídrico, a contaminação das águas e conflitos de uso, tampouco promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa. Assim, para preencher essa lacuna, foi elaborada a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

A gestão dos recursos hídricos se concretiza por motivação política, condição necessária para que seja possível planejar o aproveitamento e o controle dos recursos hídricos, com os investimentos para a implantação de obras e de medidas recomendadas a fim de impedir o surgimento de condições adversas. A implantação de medidas e obras é o objetivo da administração dos recursos hídricos, incluindo-se, entre seus instrumentos, a outorga do direito de uso, o controle, a fiscalização e a cobrança (RIGHETTO, 1998).

A fim de possibilitar a gestão dos recursos hídricos, a lei federal supracitada prevê os seguintes instrumentos (BRASIL, 1997): os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. De acordo com Fukunaga (2012), para a elaboração de projetos e análises de alternativas técnicas é importante o desenvolvimento de tecnologias e a disponibilidade de dados hidrológicos, todavia no Brasil essas informações encontram-se dispersas tornando o levantamento dos dados um desafio (GARBOSSA et al., 2011; BRESSIANI et al., 2015).

3.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

Com a impossibilidade de se quantificar diretamente os fenômenos físicos que ocorrem na natureza, os modelos hidrológicos se tornam ferramentas essenciais para o preenchimento de diversas lacunas de informações que se fazem necessárias no planejamento e gestão de recursos hídricos (MARINHO FILHO et al., 2012). Para Tucci (1998), o modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite (por meio da equacionalização dos processos) representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica.

Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais já que ajudam a entender o impacto das mudanças no uso da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas (RENNÓ & SOARES, 2000). Porto & Porto (2008) relatam que diversos problemas que envolvem tomadas de decisões complexas vêm sendo enfrentados com êxito

mediante a utilização de bases de dados e modelos matemáticos como, por exemplo, no caso do gerenciamento e do planejamento de sistemas de recursos hídricos.

Os modelos matemáticos que simulam processos hidrológicos se constituem em ferramentas indispensáveis de previsão e análise quando se deseja garantir um uso sustentável dos recursos hídricos (a médio e longo prazo), auxiliando na identificação de estratégias que harmonizem a vocação dos ecossistemas com sistemas de ocupação nas áreas de bacias hidrográficas, viabilizando assim um modelo diferenciado de ocupação dessas áreas no qual o respeito às questões ambientais seja prioridade (CHAGAS et al., 2009). Lopes (2008) explana que a modelagem hidrossedimentológica é um importante instrumento para avaliar a produção de água e sedimentos em bacias hidrográficas num tempo e custo acessíveis. Segundo Machado (2002), o baixo custo é uma importante vantagem da simulação já que, em geral, o custo de executar um programa computacional é muitas ordens de magnitude menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental.

Christofolletti (1999) expõe que modelo pode ser compreendido como sendo qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução. Já Kobiyama & Manfroi (1999) definem modelo como uma apresentação do sistema (ou objeto) tanto estático quanto dinâmico.

Machado (2002) afirma que a modelagem consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. A observação ou medição contínua de processos chama-se monitoramento o qual determina o sucesso do modelo, da modelagem e da simulação, segundo Kobiyama & Manfroi (1999). O objetivo da modelagem, de acordo com Machado (2002), é compreender o sistema e prever situações futuras, algumas vezes também reproduzir o passado, para direcionar as ações de decisão.

Bellon (2014) elucida que os modelos hidrológicos fornecem informações importantes, como: (i) hidrograma para análise do comportamento hidrológico, (ii) simulação das vazões com dados de chuva em determinado período, (iii) ampliação das séries históricas das vazões previstas, tendo como dados de entrada séries mais longas de precipitação, (iv) regionalização das vazões ou parâmetros do modelo para bacias que não possuem registros fluviométricos, (v) estimativa do balanço hídrico, (vi) previsão das vazões desconhecidas a partir da definição de cenários de uso e ocupação dos solos, e (vii) estimativa das cargas de sedimentos e poluentes (pontuais e difusas). Santos (2009) relata que a modelagem

hidrológica permite verificar a consistência das informações disponíveis (dados observados), que são em geral muito curtas, obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados, permitindo, por exemplo, a geração de séries sintéticas e a utilização dos modelos como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas.

A simulação é o processo de utilização do modelo que, de modo geral, é dividida em três etapas: a estimativa ou ajuste, verificação (ou validação) e previsão. A estimativa ou ajuste é a fase onde os parâmetros devem ser determinados para posteriormente proceder com a validação que é a simulação do modelo com os parâmetros já definidos onde se verifica a validade do ajuste realizado e finalmente a previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de suas respostas a diferentes entradas (TUCCI, 1998).

Kobiyama & Manfroi (1999) ressaltam que é indispensável realizar a calibração do modelo (sempre feita com dados obtidos pelo monitoramento) sendo que quanto mais sofisticado o modelo, mais calibrações são necessárias. Os autores ressaltam ainda que o sucesso da modelagem e da simulação depende da qualidade do monitoramento o que demonstra que esses dois métodos científicos são mutuamente complementares, efetuados sempre paralelamente.

Segundo Tucci (1998) os modelos são usualmente classificados em: físicos, analógicos e matemáticos. O modelo físico, na maior parte dos casos, representa o sistema por um protótipo em escala menor, enquanto os modelos analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente, o processo desejado. Já os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema por meio de equações matemáticas, o que os tornam mais versáteis já que se pode facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade de resposta. Ainda segundo o mesmo autor, os modelos podem também ser classificados segundo vários critérios encontrados na literatura:

- Contínuo ou discreto: um sistema é contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo e discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. A maioria dos sistemas hidrológicos são contínuos e são representados por modelos discretos.

- Concentrado ou distribuído: um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial. Geralmente, os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente. Um modelo é distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo (apenas o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema).
- Estocástico ou determinístico: esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. Para Chow (1988), um modelo determinista não considera aleatoriedade; uma entrada dada sempre produz a mesma saída. Enquanto um modelo estocástico tem saídas que são pelo menos parcialmente aleatórias.
- Conceitual ou empírico: um modelo é conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Esta definição é estabelecida para diferenciar os modelos que consideram os processos físicos, dos modelos ditos “caixa-preta”. Esses modelos (também denominados como empíricos) são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

Rennó & Soares (2000) corroboram com o exposto acima e elucidam que os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos sendo comumente considerados (dentre outras formas) de acordo com: o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos para suprir demandas específicas por ferramentas de gestão de recursos hídricos (NOGUEIRA et al., 2015), os comumente utilizados estão: HSPF (*Hydrologic Simulation Program-Fortran*), PRMS (*Precipitation-Runoff Modeling System*), WEPP (*Water Erosion Prediction Project*), TOPMODEL (*Topography-based hydrological model*), WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*), SHE (*System Hydrologic Europe*), AGNPS (*Agricultural NonPoint Source Pollution Model*), AnnAGNPS (*Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model*), ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*),

ANSWERS-Continuous (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Continuous*), CASC2D (*Cascade of planes in 2-Dimensions*), MIKE SHE (*European Hydrological System Model*), DWSM (*Dynamic Watershed Simulation Model*), KINEROS (*Kinematic Erosion Model*), HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System*), SWMM (*Storm Water Management Model*), GLEAMS (*Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System*), EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*), SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), QUAL2E e SWAT (FERRIGO, 2014).

3.4.1 *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT

Dentre os diversos modelos hidrológicos concebidos, há o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) que foi desenvolvido para prognosticar o impacto das práticas de gestão de solo nos recursos hídricos, a produção de sedimentos e a aplicação de produtos químicos nas plantações dentro dos grandes complexos de bacias hidrográficas, com diversos tipos de solo, uso do terreno e condições de gestão, após um longo período de tempo (NEITSCH et al., 2011).

Este modelo foi criado no início da década de 90 tendo origem em modelos desenvolvidos anteriormente pela *United States Department of Agriculture – USDA* e *Agricultural Research Services – ARS*, incluindo o *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems – GLEAMS*, *Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems – CREAMS* e *Erosion Productivity Impact Calculator – EPIC*. O atual modelo SWAT é descendente direto do *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) juntamente com o *Routing Outputs to Outlet* (ROTO), QUAL2E e CFARM (GASSMAN et al., 2007 e ARNOLD et al., 2012b), conforme demonstra a Figura 2.

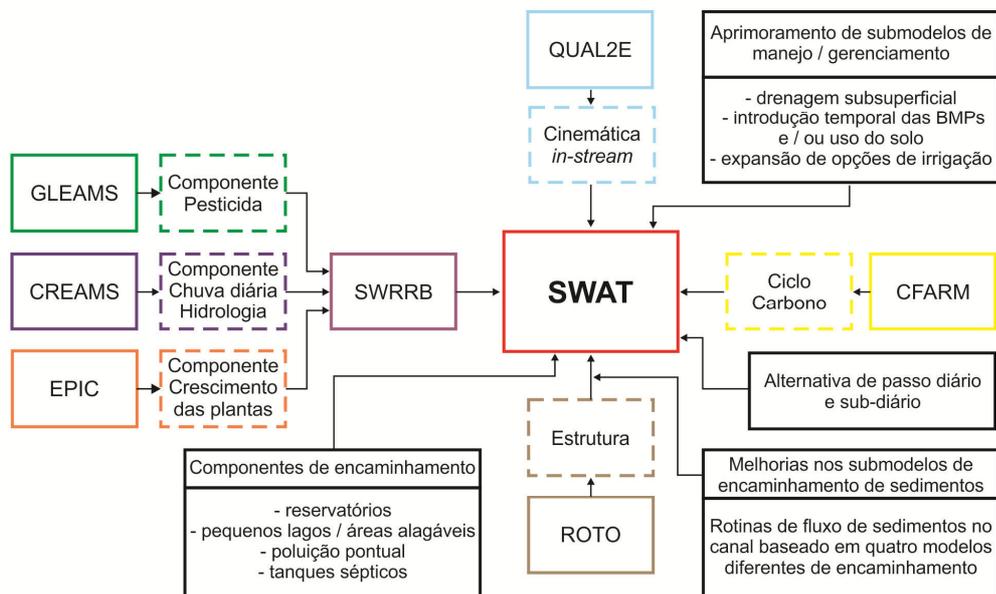


Figura 2 – Esquema da história de desenvolvimento do SWAT e suas adaptações
Fonte: Adaptado de Gassman et al. (2007) e Arnold et al. (2012b)

No decorrer dos anos o modelo foi submetido a inspeções e expansão de suas capacidades o que culminou em diversos aperfeiçoamentos do SWAT (Quadro 1).

Quadro 1 – Melhorias realizadas no modelo ao longo do tempo

Nome do Modelo	Melhorias
SWAT94.2	Incorporação de Unidades de Respostas Hidrológicas Múltiplas (URHs)
SWAT96.2	Autofertilização e auto irrigação adicionados às opções de gerenciamento; incorporado ao armazenamento na copa das árvores; adição de um componente CO ₂ ao modelo de crescimento de colheita para os estudos de mudança climática; a equação de potencial evapotranspiração de Penman-Monteith foi acrescentada; fluxo lateral da água no solo baseado no modelo de acúmulo cinemático; adição de equações de QUAL2E do fluxo de nutrientes e qualidade de água; rota do fluxo de pesticidas.
SWAT98.1	Melhoria nas rotinas de derretimento de neve; aprimoramento da qualidade do fluxo de água; expansão das rotinas do ciclo de nutrientes; pastagem, aplicações de adubo, e telha de drenagem adicionados como opções de gerenciamento; modelo modificado para uso no hemisfério sul.
SWAT99.2	Melhorias nas rotinas do ciclo de nutrientes; rotinas de arroz e pântanos foram aprimoradas, adição do processo de decantação para remoção de nutrientes em reservatórios/açudes/pântanos; adição do acúmulo de água nas margens em toda sua extensão; inclusão da rota dos metais por toda a extensão do rio; todas as referências de ano nos modelos mudaram de 2 últimos dígitos por ano para 4 dígitos por ano; as equações de crescimento de limpeza urbana do SWMM foram adicionadas juntamente com as

Nome do Modelo	Melhorias
	equações de regressão do USGS.
SWAT2000	Rotinas de transporte de bactérias foram incluídas; infiltração de Green & Ampt foi adicionada; gerador de clima aperfeiçoado; permissão para radiação solar diária, umidade relativa e velocidade do vento, para ser lida ou gerada; permissão de leitura ou cálculo de valores potenciais ET para bacias hidrográficas; todos os métodos potenciais ET foram revisados; melhoria nos processos de elevação de faixa; possibilidade de simulação de uma quantidade ilimitada de reservatórios; adição do método de rotas Muskingum; alteração dos cálculos inativos por simuladores apropriados às áreas tropicais.
SWAT2009	Melhoria nas rotinas de transporte de bactérias; cenários de previsão do tempo adicionados; geradores de pressão sub-diários acrescentados; o parâmetro de retenção usado no cálculo diário do CN pode ser uma função da presença de água no solo (lençol d'água) ou evapotranspiração das plantas; aprimoramento para o modelo de filtro por faixas de vegetação; melhoria da deposição úmida e seca do nitrato e da amônia; modelagem dos sistemas locais de esgoto.

Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011)

Além das alterações supracitadas, foram desenvolvidas interfaces do modelo com os programas Windows (*Visual Basic*), GRASS e ArcView.

O SWAT destaca-se por ser um modelo completo que permite que vários processos físicos sejam simulados na bacia com o objetivo de analisar os impactos causados pelas ações antrópicas e por processos naturais, além de também permitir avaliar alterações no uso e ocupação do solo na bacia, sobre o escoamento superficial e subterrâneo, a produção e transporte de sedimentos e nutrientes e a qualidade da água (PINTO, 2011). Garrido (2003) utilizou a classificação proposta por Tucci (1998) e classificou o SWAT como um modelo de simulação matemática contínuo, semidistribuído, determinístico e semiconceitual, que requer informações (dados de entrada) específicas.

Esse programa tem a finalidade de prognosticar o impacto das práticas de gestão de solo nos recursos hídricos, a produção de sedimentos, a aplicação de produtos químicos nas plantações sendo caracterizado como um modelo de produção de longo prazo. Para satisfazer estes objetivos o modelo: (a) é baseado em características físicas da bacia; (b) utiliza dados de entrada normalmente disponíveis em órgãos governamentais; (c) é computacionalmente eficiente; e (d) é contínuo no tempo o que permite o estudo dos impactos de longo prazo no solo. Os benefícios desta abordagem é que este modelo pode ser utilizado em bacias hidrográficas sem monitoramento (o que implica na dispensa do processo de calibração) e os impactos relativos aos dados de entrada podem ser quantificados (NEITSCH et al., 2011). A

aplicabilidade do SWAT permite que os resultados simulados sejam ajustados em relação aos observados, propiciando a análise da variabilidade do processo de forma segmentada (CASTRO, 2013).

De acordo com Oliveira (2013), o SWAT tem despertado interesse mais recentemente devido à possibilidade de conferir maior representatividade e maior praticidade de execução e aplicação. Uzeika (2009) afirma que este modelo possui aplicabilidade comprovada para auxiliar gestores ambientais em práticas de conservação do solo e água em bacias hidrográficas.

Hyde et al. (2006) selecionaram 25 modelos de modelagem hidrossedimentológica para estudá-los em função de 05 critérios de avaliação: (1) aplicabilidade do modelo para manejo florestal; (2) acessibilidade dos *softwares* e documentos; (3) facilidade de uso e existência de interface gráfica; (4) disponibilidade de manuais e bibliografia específica; (5) consistência dos processos simulados no estado da arte da hidrologia e da geomorfologia; apresentação das limitações do modelo de forma clara; suporte do modelo por publicações da comunidade científica sobre a teoria, comparações e validações. Como resultado foi elaborado um ranking dos melhores modelos sendo que o SWAT apresentou o melhor desempenho em função dos critérios apresentados, destacando-se os critérios 2 (acessibilidade), 4 (documentação) e 5 (consistência dos processos; limitações; publicações).

Em um trabalho de revisão sobre os estudos publicados, entre 1999 a 2015 relativos às aplicações do SWAT no Brasil, foram identificados 102 estudos em revistas internacionais, anais de conferência, teses ou dissertações. Observou-se que o primeiro trabalho publicado é de Oliveira & Medeiros (1999), onde foram estudados os efeitos provenientes da alteração no solo em uma bacia no nordeste, esta revisão possibilitou verificar que houve maior número de estudos com a aplicação deste modelo a partir do ano de 2009. A maioria dos estudos foi realizada na região sul (34%) seguido pelo sudeste (28%), nordeste (22%) e em menor grau na região norte (1%), com apenas um trabalho publicado (BRESSIANI et al., 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Localização

O objeto do presente estudo, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu, está situada na porção centro-sul do município de Palmas. A área é cortada por três rodovias estaduais (TO-050, TO-020 e TO-030) que dão acesso às regiões norte, sul e leste do Estado (TOCANTINS, 2012). Nesta bacia também estão inseridas parte da área de três unidades de conservação: Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN denominada Bela Vista, a Área de Proteção Ambiental – APA Serra do Lajeado e o Parque Estadual do Lajeado.

Salienta-se que a área da bacia foi definida automaticamente pelo modelo hidrológico utilizado, SWAT, considerando a localização da Estação de Tratamento de Água (ETA 006) como exutório (Figura 3).

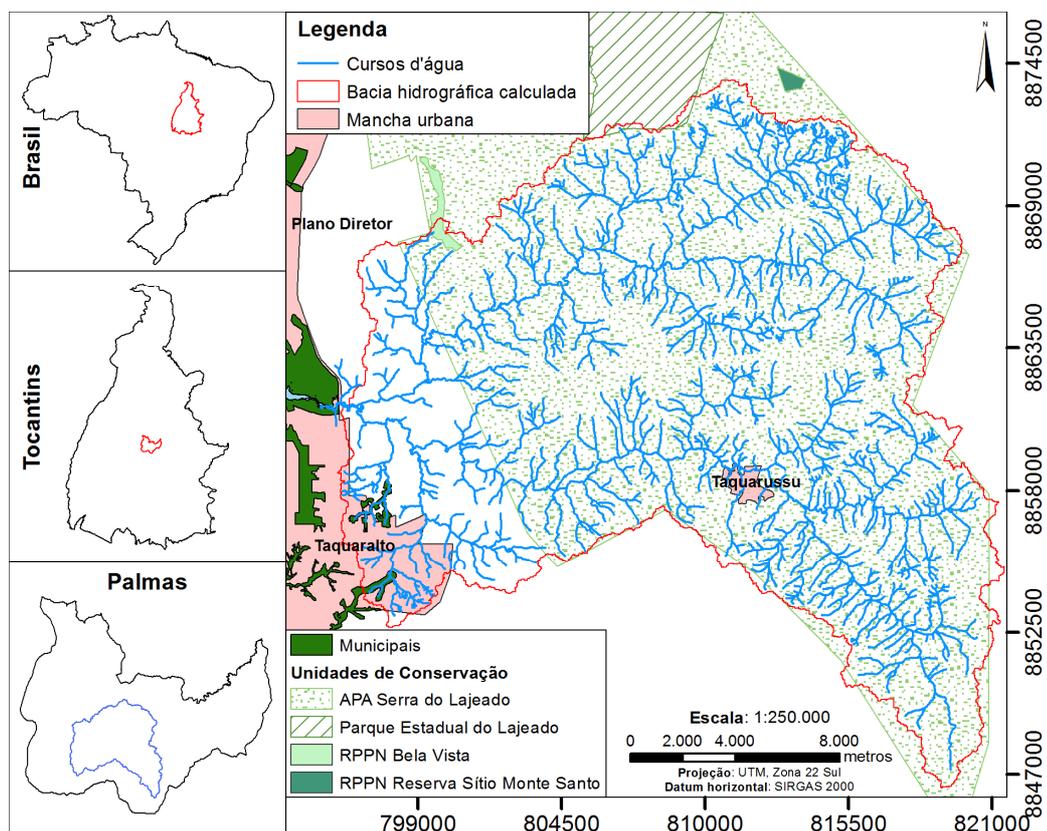


Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu

4.1.2 Clima

De acordo com a classificação de Köppen, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu encontra-se inserida no tropical chuvoso dos cerrados tropicais (Aw), apresentando duas estações bem definidas, caracterizadas por máximo de precipitação no verão (outubro a

março - 1500 mm a 2000 mm) e o período seco no inverno (abril a setembro - inferior a 60 mm) o que representa 85% da precipitação total anual e 15% da precipitação anual, respectivamente. A temperatura média anual é de 28° C, as máximas absolutas superam os 41°C e as mínimas são maiores que 18°C (TOCANTINS, 2012). Especificamente a bacia estudada apresenta no período seco lâmina total precipitada o valor de 113,2 mm, enquanto que no período chuvoso é de 1686,8 mm (TOCANTINS, 2015).

4.1.3 Declividade

De forma geral, a bacia é caracterizada predominantemente por áreas com suaves declives (de 0 a 8 graus) seguido por locais de 8 a 20 graus, conforme demonstra a Figura 4.

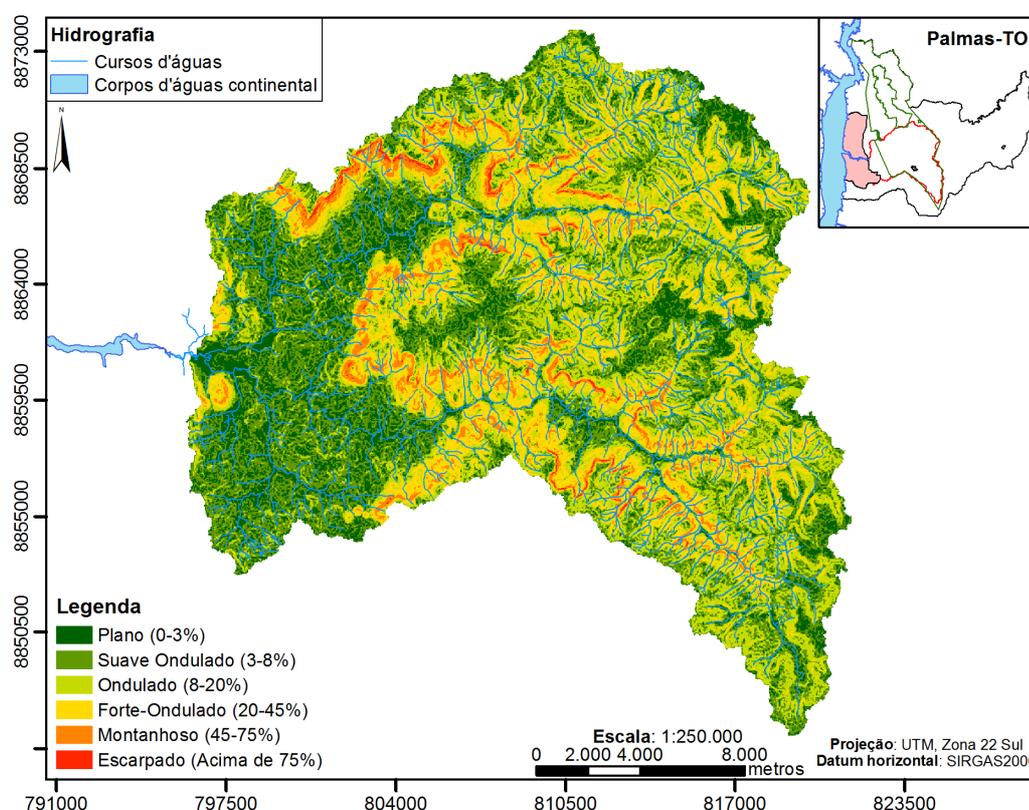


Figura 4 – Mapa de declividade da bacia

As regiões com fortes declives estão agrupadas nas encostas da serra do Lajeado e formam dois grandes vales, do Ribeirão Taquaruçu Grande e Taquaruçuzinho (MARQUES, 2011).

4.1.4 Geologia

Segundo os levantamentos realizados por Santos (2000) e Tocantins (2012), os ambientes geológicos existentes na área são pertencentes aos domínios da Bacia Sedimentar do Parnaíba, da Faixa de Dobramentos do Proterozóico Médio e Superior e Complexos Metamórficos do Arqueano e Proterozóico Inferior (Figura 5).

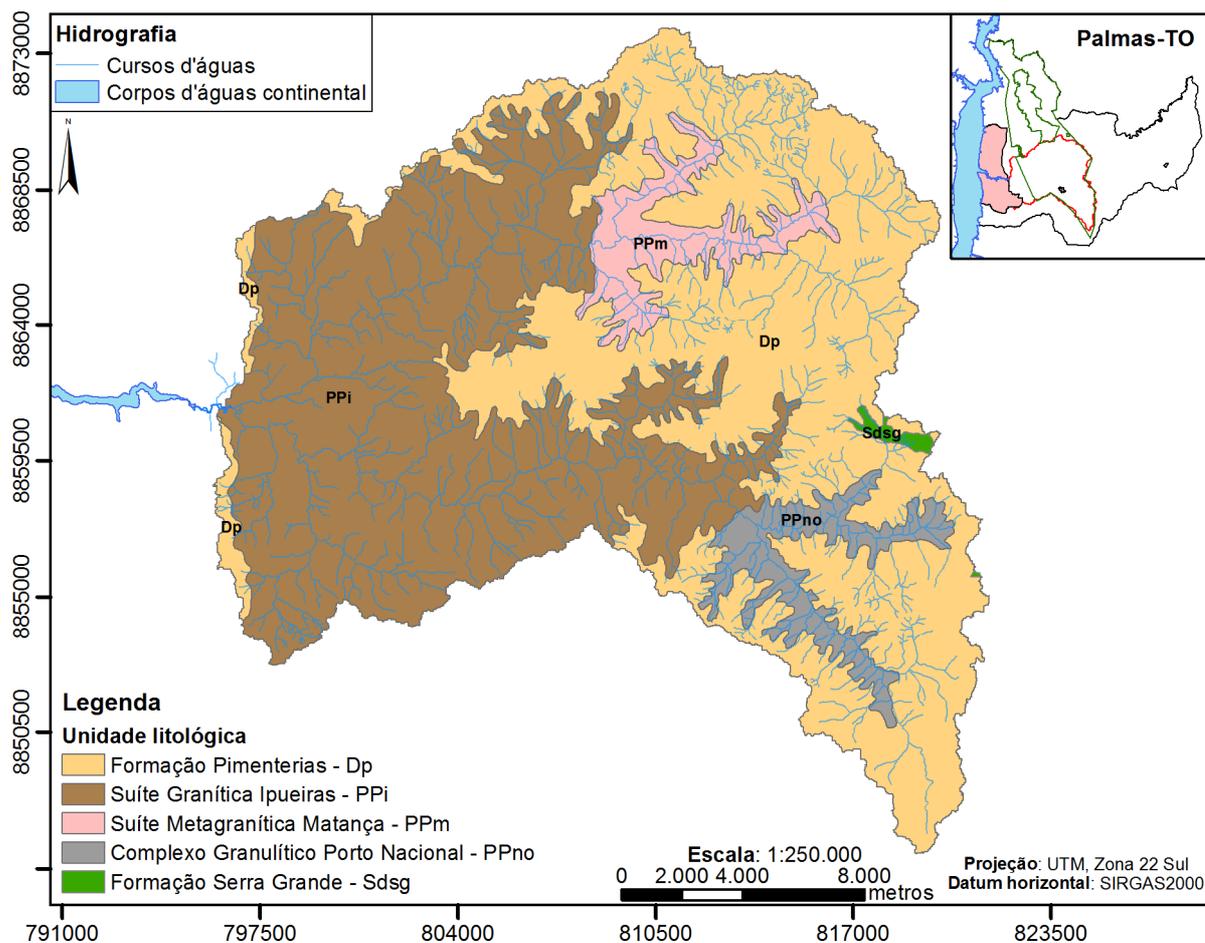


Figura 5 – Mapa geológico

A Bacia Sedimentar do Parnaíba está representada pela Formação Serra Grande (SDsg) e Formação Pimentérias (Dp), a primeira é caracterizada por apresentar uma sequência siliclástica e estratificações plano-paralelos cruzada (de pequeno a grande porte), tabular e acanalada, constituída por estratos de arenitos arcoseanos grosseiros com níveis e camadas conglomeráticas siltíticas e argilíticas. Já a Formação Pimentérias caracteriza-se por apresentar uma sequência clástica com predominância pelítica e estratificação plano-paralela e tabular, constituído por estrado e lentes areníticas na base, gradando para siltitos, argilitos e folhelos no topo.

Os Complexos Metamórficos do Arqueano e Proterozóico Inferior está representado pela Suíte Metagranítica Matança (PPm) e Suíte Granítica Ipueiras (PPi). A Suíte Granítica Matança caracteriza-se por apresentar batólito constituído por biotita – monzogranitos e granodioritos, ambos porfiriticos e de granulometria grossa, sienogranitos de granulometria fina a média, augen – granitos porfiroblásticos, diques xenólitos diorítos. Apresenta ainda

feições de caráter dúctil – rúptil, lineação de estiramento sub-horizontal, foliação milonítica e texturas gnáissicas.

A Suíte Granítica Ipueiras apresenta stoks e batólito constituídos por monzogranitos, sienos granitos, biotita - monzogranitos e quartzo – sienitos, todos inequigranulares, porfíricos, de granulometria média a grossa e geralmente comportamento isotrópico, porém às vezes apresenta deformação dúctil incipiente e rúptil nas zonas preferenciais.

A Faixa de Dobramentos do Proterozóico Médio e Superior está representada pelo Complexo Granulítico Porto Nacional (Ppno) que compreende a Associação Ortogranulítica (Ppno), uma Associação de Rochas Supracrustais (Ppnp), apresentando metamorfismo de em alto grau de fácies de granulito e anfibólito.

4.1.5 Geomorfologia

A Bacia do Ribeirão Taquaruçu apresenta relevo pouco diversificado, onde foram identificadas apenas duas unidades geomorfológicas distintas (UNITINS, 1999 apud CHIESA, 2016):

- Depressão Tocantins: constituída pela superfície compreendida entre o Sopé das Serras do Carmo, Taquaruçu e Lajeado. Esta região que representa a calha do Rio Tocantins é constituída pelas formações Pimenteiras e Serra Grande apresentando relevo suave ondulado e altitude variando entre 200 e 300 metros;
- Planalto Residual Tocantins: formado pelas Serras do Carmo, Taquaruçu e Lajeado, sendo estas separadas por vales onde a incisão da drenagem está em média de 250 a 300 metros. Nesta área a estrutura exerce grande controle sobre a dinâmica da água, apresentando alta densidade de drenagem. Nas encostas destas serras são observadas superfícies escarpadas, tipo padrões de rochas, onde há muitos pontos de nascentes de tributários que irão compor a rede de drenagem da bacia. Em áreas da encosta das serras, a região é recoberta por material coluvial, sendo comum a presença de blocos rolados.

4.1.6 Pedologia

O trabalho desenvolvido por Santos (2000) demonstra que o objeto do presente estudo possui as seguintes classes de solos: latossolos vermelho-amarelos, latossolos vermelho-amarelos em associação com plintossolos pétricos, cambissolos háplicos em associação com neossolos litólicos, latossolos vermelhos, neossolos flúvicos em associação

com gleissolos háplicos, plintossolos pétricos e neossolos litólicos, aqui elencados em ordem decrescente segundo a porcentagem de ocorrência em relação à área total da bacia (Figura 6).

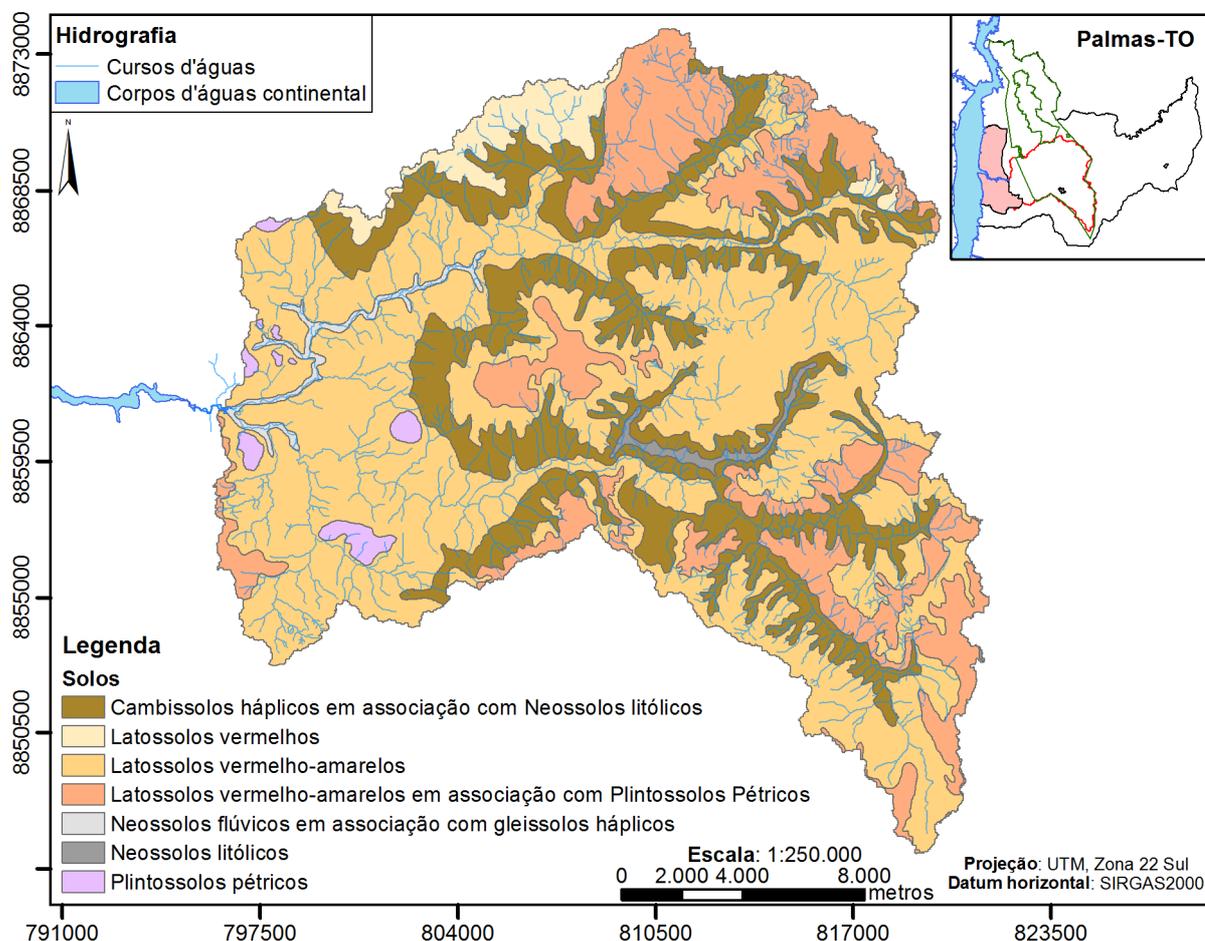


Figura 6 – Mapa pedológico

Os latossolos vermelho-amarelos estão distribuídos por quase toda a área de estudo, em áreas com relevo predominantemente plano e com declividades inferiores a 10%.

Os latossolos vermelho-amarelos em associação com plintossolos pétricos encontram-se distribuídos em manchas no centro, nordeste, sudeste e sudoeste da área de estudo, em locais com relevo predominantemente plano a suave ondulado e declividades inferiores a 20%.

Os cambissolos háplicos em associação com neossolos litólicos estão distribuídos em estreitas faixas que estendem-se do extremo norte ao extremo sudeste e no nordeste da área de estudo, em locais com relevo ondulado a fortemente ondulado e com declividades maiores que 20%.

Os latossolos vermelhos encontram-se em manchas no norte e nordeste da área de estudo, em locais com relevo predominantemente plano com declividades inferiores a 10%.

Os neossolos flúvicos em associação com gleissolos háplicos ocupam o centro da bacia para a foz, ocorrendo às margens do ribeirão Taquaruçu Grande e de alguns de seus tributários, em locais com relevo muito plano e declividades inferiores a 5%.

Os plintossolos pétricos estão distribuídos em manchas ao centro, noroeste e sudoeste da área em estudo, em locais com relevo predominantemente plano e com declividades inferiores a 10%.

Os neossolos litólicos encontram-se distribuídos em uma estreita faixa no centro – leste da área de estudo, em locais com relevo ondulado a fortemente ondulado e com declividades maiores que 20%.

4.1.7 Hidrografia

O Ribeirão Taquaruçu Grande é o principal corpo hídrico desta bacia que é formada por duas microbacias: Ribeirão Taquaruçuzinho e Ribeirão Taquaruçu Grande, cujos principais contribuintes pela margem esquerda são o Ribeirão Taquaruçuzinho, o Córrego Machado e o Córrego Buritizal, e pela margem direita são o Córrego Macacão e o Córrego Tiúba (PALMAS, 2014a).

As nascentes do Ribeirão Taquaruçu Grande se localizam na Serra do Lajeado e desagua no reservatório da Usina Hidroelétrica Luiz Eduardo – UHE Lajeado, junto à área urbana de Palmas (TOCANTINS, 2004), portanto, a bacia é afluente do Rio Tocantins.

Esta bacia é considerada de quarta ordem e apresenta baixa densidade de drenagem sendo caracterizada por possui relevo plano e suave (PALMAS, 2014a), a Tabela 1 apresenta alguns índices morfométricos referentes ao objeto de estudo.

Tabela 1 – Índices morfométricos da Bacia do Ribeirão Taquaruçu

Índices	Unidade	Valor
Comprimento do canal principal – L	km	36,99
Rede de drenagem total – Dt	km	494,17
Densidade de drenagem – Dd	km/km ²	1,08
Fator de forma – F	-	0,33
Coefficiente de compacidade – Kc		1,51
Índice de circularidade – Ic		0,43
Ordem dos cursos de água		4

Fonte: Palmas (2014a)

O regime pluvial desta área tende a apresentar escoamento superficial pouco significativo o que gera mecanismos de erosão hídrica ligados ao processo inicial de chuva, provocando a erosão laminar ou em lençol, decorrente do atrito do próprio escoamento superficial que conduz material erodido dos pontos abaixo das encostas para as calhas

fluviais. Considerando que quanto mais ramificada for a rede, mais eficiente será o sistema de drenagem, o valor da ordem dos cursos de água revela-se como de baixa densidade de drenagem e de efetividade reduzida. A bacia em questão apresentou índice de circularidade (Ic), coeficiente de compacidade (Kc) e fator de forma (F) que indica que a bacia é alongada, possuindo menor concentração do deflúvio. Desta forma, infere-se que a bacia hidrográfica apresenta risco moderado de enchentes nas condições normais de precipitação (PALMAS, 2014a).

4.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Foram utilizados os seguintes programas computacionais:

- ArcGIS 10.3, desenvolvido por *Environmental Systems Research Institute* – ESRI, foi utilizado para a elaboração dos mapas (classificação);
- SPRING 5.3, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, foi utilizado para a elaboração dos mapas (processamento básico – segmentação e fragmentação);
- pcpSTAT, desenvolvido por Liersch (2003), para calcular os parâmetros estatísticos dos dados diários de precipitação;
- ArcSWAT 2012.10.19 (extensão do ArcGIS-ArcView), desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station e Department of Agriculture, Agricultural Research Service – USDA*), foi utilizado para a execução da modelagem;
- SWAT-CUP 2012 5.1.6.2, desenvolvido por Abbaspour (2015) para realizar a análise de sensibilidade e incertezas, calibração automática de parâmetros e validação de séries.

4.3 DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT

No presente trabalho é apresentada uma descrição sucinta de parte do processo e do equacionamento do modelo SWAT fundamentada em Neitsch et al. (2011), por isso ressalta-se que maior detalhamento de todo o processo de simulação, bem como das fórmulas utilizadas pelo modelo podem ser visualizadas no estudo supracitado e no trabalho de Arnold et al. (1998).

A Figura 7 mostra o fluxo dos processos usados pelo SWAT para modelar o balanço hídrico.

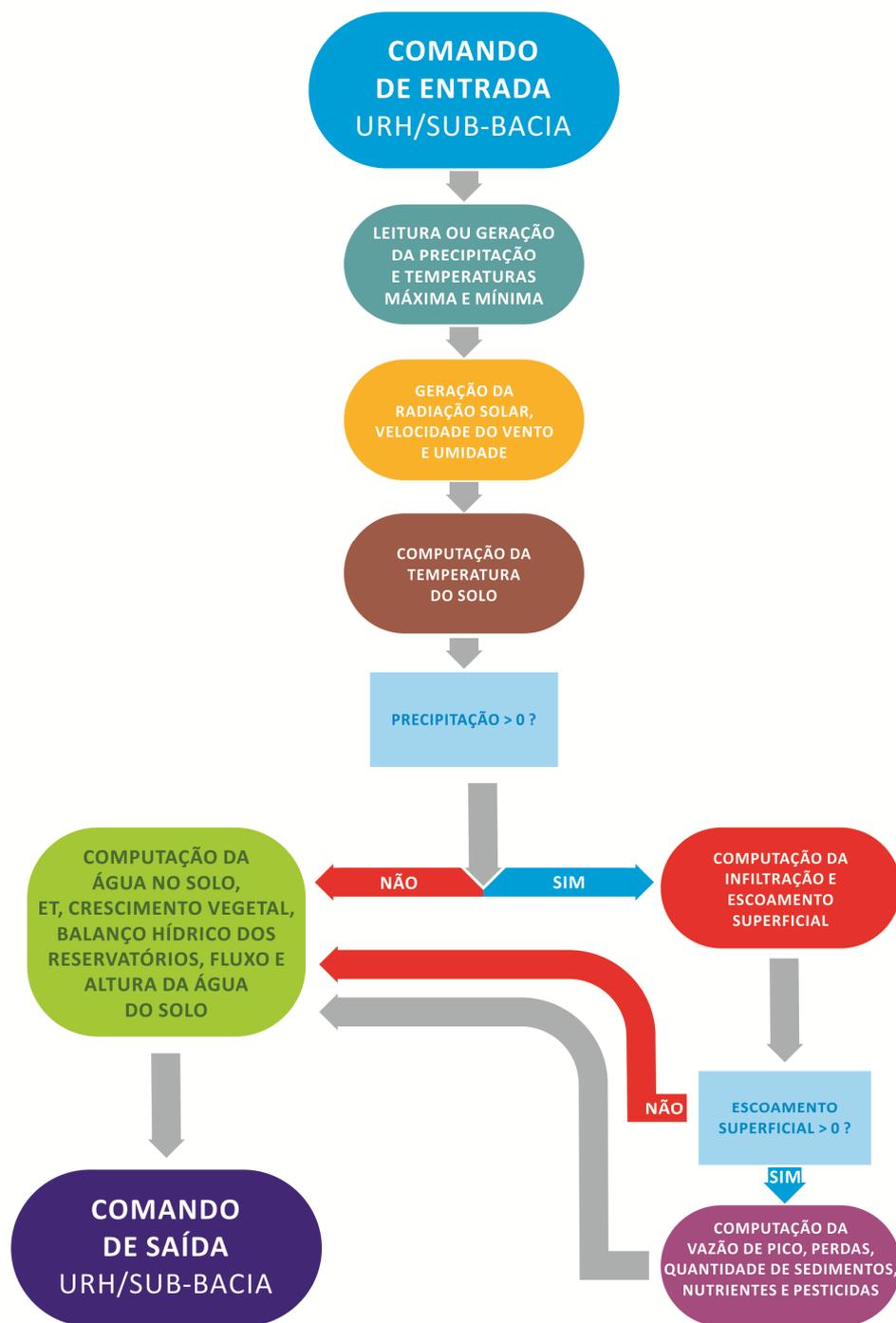


Figura 7 – “Loop” do Comando para o cálculo do balanço hídrico
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011)

O equilíbrio hídrico é a força motora do modelo SWAT, sendo que o processo de simulação do SWAT divide-se em duas fases do ciclo hidrológico: fase terrestre e fase de propagação. A primeira é relativa à fase do terreno do ciclo hidrológico que controla a quantidade de água, sedimento, nutriente e descarga de pesticida no canal principal de cada

bacia, enquanto a segunda fase refere-se à fase do itinerário do ciclo hidrológico que pode ser definida como a movimentação da água, sedimentos e outros pela rede de canais da bacia hidrográfica até a descarga.

A primeira fase é subdividida em sete componentes (1 – hidrologia, 2 – clima, 3 – sedimentos, 4 – crescimento vegetal, 5 – manejo agrícola, 6 – nutrientes e 7 – pesticidas), enquanto a segunda fase pode ser dividida em dois componentes (1 – propagação no canal principal e 2 – propagação no reservatório).

Os processos hidrológicos simulados pelo SWAT incluem a interceptação e armazenamento nas copas das árvores, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração, fluxo lateral, drenagem subsuperficial, redistribuição da água no perfil do solo, utilização da água por meio de bombeamento (caso haja), retorno do fluxo e recarga por infiltração.

É importante citar que o clima (precipitação diária, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar) é o principal agente indutor do ciclo hidrológico, pois controla o equilíbrio da água. O modelo SWAT pode ler esses dados monitorados a partir de arquivos inseridos ou produzir os dados por meio de um gerador de tempo (*weather generator* – WXGEN) com fundamento em estatísticas mensais observadas.

O modelo também subdivide a bacia hidrográfica em Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs) que são áreas acidentadas dentro de sub-bacias que são formadas por uma única cobertura de terra, solo e combinações de gestão. Estas URHs permitem que o modelo revele diferenças na evapotranspiração provenientes dos diversos manejos e solos existentes em cada sub-bacia, sendo o escoamento superficial estimado separadamente para cada URH para posteriormente ser obtido o escoamento total para a bacia hidrográfica o que consequentemente aumenta a exatidão e fornece melhor descrição física do balanço hídrico.

4.3.1 Equacionamento

O SWAT simula o ciclo hidrológico da fase terrestre baseado na equação do balanço hídrico representada pela Equação (1):

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw}) \quad (1)$$

Onde, SW_t = quantidade final de água no solo (mm); SW_o = umidade do solo inicial no dia i (mm); t = tempo (dias); R_{day} = precipitação total diária no dia i (mm); Q_{surf} = quantidade de área de escoamento superficial no dia i (mm); E_a = quantidade de evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} = quantidade de água que entra na zona de aeração do

perfil do solo no dia i (mm); Q_{gw} = quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm), de acordo com Neitsch et al. (2011).

O escoamento superficial acontece quando a taxa de aplicação de água à superfície do solo excede a taxa de infiltração, de modo que o escoamento superficial começa quando a taxa de aplicação de água é maior que a taxa de infiltração. O modelo SWAT possibilita que o cálculo do escoamento superficial por meio de dois métodos: *SCS Curve Number* ou Curva Número e o método de infiltração de Green & Ampt, neste trabalho foi utilizado o primeiro método.

No SWAT o escoamento superficial pode ser calculado com os valores de precipitação diária pelo método da Curva Número (CN) que é um modelo empírico e proveniente de mais de vinte anos de estudo em pequenas bacias hidrográficas rurais nos Estados Unidos com o objetivo de determinar o escoamento superficial em diferentes uso e coberturas vegetal e tipo de solo representado pela Equação (2).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

Sendo: Q_{surf} = escoamento acumulado ou excesso de precipitação (mm), R_{day} = intensidade de precipitação para o dia (mm), I_a = abstração inicial que inclui o armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) e S = parâmetro de retenção (mm). O parâmetro de retenção, que representa a infiltração, varia espacialmente durante as mudanças no tipo de solo, uso do solo, manejo e declividade e de forma temporal em função das alterações no conteúdo de água no solo, sendo representada pela Equação (3):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Onde: CN = valor do número da curva para o dia i (adimensional) podendo variar de 0 a 100 e reflete o tipo de solo e o uso do solo. Quanto maior o valor de CN, maior o escoamento superficial.

Uma solução gráfica da Equação (2) para os diferentes valores de número de curva é demonstrada pela Figura 8.

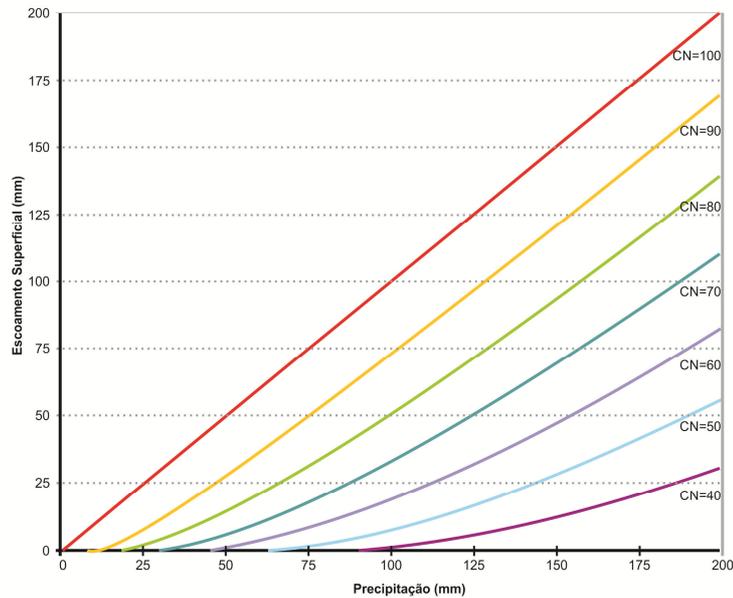


Figura 8 – Relação de escoamento superficial e da precipitação (SCS *Curve Number*)
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011)

A condição para que aconteça o escoamento superficial é que $R_{day} > I_a$, porém esta última variável (I_a) é comumente adotada como igual a $0,2S$ o que transforma a Equação (4) na Equação (5).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2 * S)^2}{(R_{day} + 0,8 * S)} \quad p/ R_{day} > 0,2 * S \quad (4)$$

$$Q_{surf} = 0 \quad p/ R_{day} \leq 0,2 * S \quad (5)$$

Este método é uma função da permeabilidade do solo, uso da terra e as condições antecedentes de água no solo. Assim, o *Natural Resource Conservation Service* – NRCS (2007) define três condições de umidade antecedente: (i) CN_1 - condição seca (ponto de murcha); (ii) CN_2 – condição de umidade média, e (iii) CN_3 – condição úmida (capacidade de campo). Os valores tabelados de CN encontram-se na condição CN_2 , por isso as Equações (6) e (7) são utilizadas para transformar em CN_1 e CN_3 , respectivamente.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 * (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636 * (100 - CN_2)])} \quad (6)$$

$$CN_3 = CN_2 * \exp^{[0,00673 * (100 - CN_2)]} \quad (7)$$

Os solos são classificados pelo NRCS (2007) em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) fundamentado nas características de infiltração dos solos, cuja definição é um grupo de

solos que tem similaridade potencial de escoamento superficial sobre a similaridade de condições de tormenta e cobertura do solo (Quadro 2).

As propriedades do solo que influenciam o escoamento superficial são aqueles que causam um impacto mínimo na taxa de infiltração para o solo exposto, depois de uma prolongada umidade e sem congelamento do mesmo.

Quadro 2 – Características dos grupos hidrológicos

Grupos Hidrológicos	Características
A	Pouco potencial de escoamento superficial. O solo apresenta alta taxa de infiltração quando está completamente úmido e alta taxa de transmissividade da água. O solo é composto por menos que 10% de argila e mais que 90% de areia ou cascalho.
B	O solo tem moderada taxa de infiltração quando completamente úmido e moderada taxa de transmissividade da água. O solo apresenta argila variando entre 10 e 20% e areia variando entre 50 e 90%.
C	O solo tem baixa taxa de infiltração quando completamente úmido e baixa taxa de transmissividade da água. O solo apresenta argila variando entre 20 e 40% e areia menos que 50%.
D	Alto potencial de escoamento superficial. O solo apresenta taxa de infiltração muito baixo quando completamente úmido o que torna o movimento da água no solo restrito ou muito restrito e apresenta taxa de transmissividade da água muito baixo. O solo é constituído com mais de 40% de argila e menos que 50% de areia.

Fonte: Adaptado de NRCS (2007)

Para os solos brasileiros foi proposta, por Sartori (2004), uma classificação hidrológica baseada nas características dos solos frequentemente presentes no país, além de ter determinado CN de referência para alguns complexos hidrológicos envolvendo tipos de uso.

A equação assume que o perfil do solo é homogêneo e que a umidade antecedente é distribuída uniformemente no perfil. À medida que a água infiltra no solo, o modelo assume que o solo acima está completamente saturado e há um rompimento marcante no teor de umidade do solo na frente de molhamento. A Figura 9 demonstra a diferença entre a distribuição da umidade com a profundidade do solo modelada pela equação de Green & Ampt e o que ocorre na realidade.

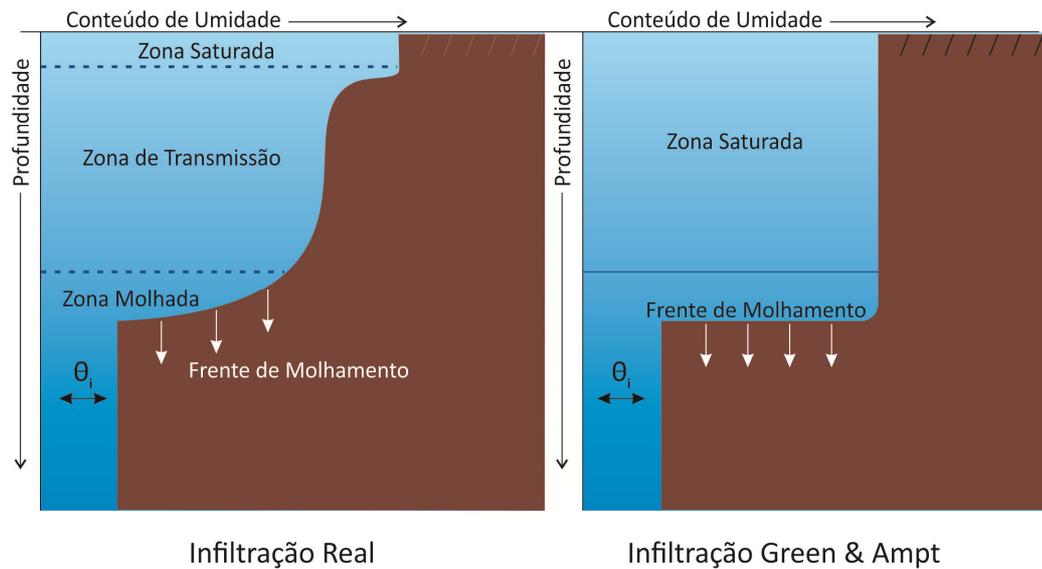


Figura 9 – Comparação da distribuição de umidade (Green & Ampt e distribuição observada)
Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011)

O método do excesso de chuvas Green-Ampt Mein-Larson foi incorporado no SWAT para fornecer uma opção alternativa para a determinação do escoamento superficial, porém este método requer valores sub-diários de precipitação fornecidos pelo usuário.

A taxa de infiltração Green-Ampt Mein-Larson é definida pela Equação (8):

$$f_{int,t} = K_e * \left(1 + \frac{\Psi_{wf} * \Delta\theta_v}{F_{inf,t}}\right) \quad (8)$$

Onde: $f_{int,t}$ = taxa de infiltração no tempo t (mm/h), K_e = condutividade hidráulica efetiva (mm/h), Ψ_{wf} = potencial matricial da frente de molhamento matricial (mm), $\Delta\theta_v$ = alteração na umidade volumétrica do solo através da frente de umedecimento (mm/mm) e $F_{inf,t}$ = a infiltração cumulativa no instante t (mm).

De acordo com Neitsch et al. (2011), o tempo de concentração é a quantidade de tempo a partir do início de um evento pluviométrico até que a área inteira da sub-bacia esteja contribuindo para o fluxo de saída (exutório).

O tempo de concentração é calculado pela soma dos tempos de escoamento terrestre (o tempo que leva para a água escoar do ponto mais remoto da sub-bacia até alcançar o canal) e escoamento no canal (o tempo que leva para a água escoar dos canais das sub-bacias até suas respectivas exutórias):

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (9)$$

Onde: t_{conc} = tempo de concentração na sub-bacia (h), t_{ov} = tempo de concentração na superfície (h) e t_{ch} = tempo de concentração no curso d'água (h).

O tempo de concentração na superfície é determinado pela Equação (10):

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} * n^{0.6}}{18 * slp^{0.3}} \quad (10)$$

Onde: L_{slp} = comprimento da encosta (m); n = coeficiente de rugosidade de Manning e slp = declive médio da sub-bacia (m/m).

O tempo de concentração do escoamento no canal é representado pela Equação (11):

$$t_{ch} = \frac{0,62 * L * n^{0,75}}{A^{0,125} * slp_{ch}^{0,375}} \quad (11)$$

Sendo: L = comprimento do canal do ponto mais distante até a exutória da sub-bacia (km), n = coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia (adimensional), A = área da sub-bacia (km²) e slp_{ch} = declividade do canal (m.m⁻¹).

A vazão de pico é a máxima vazão provocada por um evento de precipitação, sendo um indicador do potencial erosivo de uma precipitação podendo ser usado para estimar a perda de sedimentos na bacia hidrográfica (NEITSCH et al., 2011). O modelo SWAT calcula a vazão de pico por meio do método racional modificado – Equação (12).

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} * Q_{surf} * A}{3.6 * t_{conc}} \quad (12)$$

Sendo: q_{peak} = vazão de pico (m³.s⁻¹), α_{tc} = fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração da bacia (adimensional), Q_{surf} = escoamento superficial (mm), A = área da sub-bacia (km²), t_{conc} = tempo de concentração da sub-bacia (h) e 3,6 é o fator de conversão da unidade.

O modelo incorpora um recurso de armazenamento de escoamento superficial para retardar a liberação de uma parte do escoamento superficial para o canal principal. Uma vez que o escoamento superficial é calculado, a quantidade de escoamento superficial que atinge o canal principal é calculada pela Equação (13):

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1} * (1 - \exp[\frac{-surlag}{t_{conc}}])) \quad (13)$$

Onde: Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial descarregado no canal principal (mm), Q'_{surf} = quantidade de escoamento superficial gerado na sub-bacia (mm), $Q_{stor,i-1}$ = escoamento superficial armazenado ou atrasado a partir do dia anterior (mm), $surlag$ =

coeficiente de atraso do escoamento superficial (adimensional) e t_{conc} = tempo de concentração para a sub-bacia (h).

A evapotranspiração é um termo coletivo que inclui todos os processos do qual a água da superfície terrestre é convertida em vapor de água, incluindo a evaporação das copas de árvores, transpiração, sublimação da neve e evaporação pelo sol. Este é o principal mecanismo pela qual a água é removida em uma bacia hidrográfica.

O dossel das plantas pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração, pois a interceptação das copas das árvores/plantas diminui a energia erosiva das gotas, além de reter uma parte da precipitação. Portanto, o dossel exerce influência nesses processos em função da densidade da cobertura da planta e a morfologia das espécies de planta.

Ao calcular o escoamento superficial, o método SCS Curva Número agrupa a interceptação no dossel das plantas, em termos de abstrações. Essa variável inclui o armazenamento de superfície e infiltração antes do escoamento, sendo considerado como 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia. Quando a equação de infiltração Green & Ampt é usada para calcular o escoamento superficial e infiltração, a interceptação de chuva pelo dossel das plantas é calculada separadamente.

O modelo permite que a quantidade máxima de água que pode ser mantida no armazenamento pelo dossel varia diariamente em função do índice de área foliar – Equação (14):

$$can_{day} = can_{mx} * \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (14)$$

Onde: can_{day} = quantidade máxima de água que pode ficar retida no dossel em um determinado dia (mm), can_{mx} = quantidade máxima de água que pode ser interceptada e armazenada no dossel quando está totalmente desenvolvido (mm), LAI = índice de área foliar para um determinado dia e LAI_{mx} = índice de área foliar máximo para a planta.

Quando a precipitação ocorre em qualquer dia, o armazenamento do dossel é preenchido antes da água chegar ao solo:

$$R_{INT(f)} = R_{INT(f)} + R'_{day} \text{ e } R_{day} = 0$$

quando $R'_{day} \leq can_{day} - R_{INT(i)}$ (15)

$$R_{INT(f)} = can_{day} \text{ e } R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{INT(i)})$$

quando $R'_{day} > can_{day} - R_{INT(i)}$ (16)

Onde: $R_{INT(i)}$ = quantidade inicial de água armazenada no dossel em um determinado dia (mm), $R_{INT(f)}$ = quantidade final de água livre armazenada no dossel em um determinado dia (mm), R'_{day} = quantidade de precipitação em um determinado dia antes que a interceptação do dossel seja removida (mm), R_{day} = quantidade de precipitação em um determinado dia, que alcança a superfície do solo (mm) e can_{day} = quantidade máxima de água que pode ser armazenada no dossel em um determinado dia (mm).

A evapotranspiração potencial (PET) é um conceito originalmente apresentado por Thornthwaite que o definiu como a velocidade pela qual a precipitação ocorreria em um local grande com cobertura uniforme caracterizada por vegetação rasteira e com abastecimento ilimitado de água no solo e que não foi exposta a advecção ou efeitos de armazenamento de calor. O SWAT permite calcular a evapotranspiração potencial por três métodos: a) Penman-Monteith, b) Priestley-Taylor e c) Hargreaves.

O método Penman-Monteith requer os dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A equação desse método combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, o estreito mecanismo requerido para remover o vapor de água e os termos aerodinâmicos e de resistência superficial, conforme demonstra a Equação (17).

$$\lambda E = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \rho_{air} * c_p * [e_z^o - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma * (1 + r_c / r_a)} \quad (17)$$

Onde: λE = densidade do fluxo de calor latente ($MJ m^{-2} d^{-1}$), E = taxa de evaporação de profundidade ($mm d^{-1}$), Δ = declividade da curva da saturação da pressão-temperatura do vapor de saturação, de/dT ($kPa ^\circ C^{-1}$), H_{net} = rede de radiação ($MJ m^{-2} d^{-1}$), G = densidade de fluxo de calor do solo ($MJ m^{-2} d^{-1}$), ρ_{air} = densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p = calor específico em pressão constante ($MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), e_z^o = pressão do vapor de saturação de ar na altura z (kPa), e_z = pressão do vapor de água de ar na altitude z (kPa), γ = constante psicrométrica ($kPa ^\circ C^{-1}$), r_c = resistência do dossel de planta ($s m^{-1}$) e r_a = resistência de difusão da camada de ar – resistência aerodinâmica ($s m^{-1}$).

Método Priestley e Taylor

O método Priestley e Taylor é uma versão simplificada da combinação de equação para utilizar quando as áreas das superfícies estão molhadas – Equação (18). O componente aerodinâmico foi removido e o componente de energia foi multiplicado por um coeficiente, $\alpha_{pet} = 1,28$, quando o ambiente em geral está molhado ou em condições de umidade.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G) \quad (18)$$

Sendo: λ = o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}), E_0 = evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), α_{pet} = um coeficiente, Δ = inclinação da curva de temperatura-pressão do vapor de saturação, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), H_{net} = radiação da rede ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e G = densidade do fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

A equação de Priestley-Taylor fornece a estimativa de evapotranspiração potencial para baixas condições advectivas. Nas áreas semi-áridas ou áridas, onde o componente de advecção do equilíbrio de energia é expressivo, a equação de Priestley-Taylor subestimar a evapotranspiração potencial.

Método Hargreaves

O método de Hargreaves foi originário de oito anos de dados de evapotranspiração na Califórnia. Diversas melhorias foram feitas na equação inicial e a forma utilizada no SWAT é:

$$\lambda E_o = 0,0023 * H_0 * (T_{mx} - T_{mn})^{0,5} * (\overline{T_{av}} + 17,8) \quad (19)$$

Onde: λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}), E_0 = evapotranspiração potencial (mm d^{-1}), H_0 = radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_{mx} = temperatura máxima do ar para um determinado dia ($^\circ\text{C}$), T_{mn} = temperatura do ar mínima para um determinado dia ($^\circ\text{C}$), e $\overline{T_{av}}$ = temperatura média do ar para um dado dia ($^\circ\text{C}$).

Uma vez que a evapotranspiração potencial é determinada, a evapotranspiração real deve ser calculada. Desse modo, o SWAT calcula primeiramente a precipitação interceptada pelo dossel da planta para logo após calcular a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo.

A evaporação é determinada a partir da evapotranspiração potencial separada em duas condições: se a evapotranspiração potencial (E_o) é menor que a quantidade de água livre mantida nas copas (R_{int}), conforme pode ser observado nas Equações (20) e (21).

$$E_a = E_{can} = E_o \quad R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (20)$$

$$E_{can} = R_{int(i)} \quad R_{int(f)} = 0 \quad (21)$$

Sendo: E_a = quantidade real de evapotranspiração que ocorre na bacia hidrográfica (mm), E_{can} = quantidade de evaporação de água livre dentro do dossel em um determinado dia (mm), E_o = potencial de evapotranspiração em um determinado dia (mm), $R_{int(i)}$ = quantidade

inicial de água livre armazenada dentro do dossel em um determinado dia (mm) e $R_{int(f)}$ = quantidade final de água livre armazenada dentro do dossel em um determinado dia (mm).

Se a equação de Penman-Monteith é a selecionada como método de evapotranspiração potencial, a transpiração será calculada pela Equação (17). Para os outros métodos (Priestley-Taylor e Hargreaves) a transpiração é calculada como:

$$E_t = \frac{E'_0 * LAI}{3,0} \quad 0 \leq LAI \leq 3,0 \quad (22)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3,0 \quad (23)$$

Onde: E_t = transpiração máxima em um determinado dia (mm), E'_0 = evapotranspiração potencial ajustada para evaporação de água livre dentro do dossel (mm), LAI = índice de área foliar. As Equações (22) e (23) calcula o valor de transpiração que ocorrerá em um determinado dia quando a planta está crescendo sob condições ideais.

A quantidade de sublimação e evaporação do solo é influenciada pelo nível de sombreamento, sendo a sublimação/evaporação de um determinado dia calculada pela Equação (24):

$$E_s = E'_0 * cov_{sol} \quad (24)$$

Sendo: E_s = sublimação máxima/evaporação em um determinado dia (mm), E'_0 = evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação de água livre no dossel (mm) e cov_{sol} = índice de cobertura do solo. O índice de cobertura do solo é calculado por:

$$cov_{sol} = \exp(-5,0 * 10^{-5} * CV) \quad (25)$$

Em que, CV = biomassa e resíduos acima do solo ($kg \ ha^{-1}$).

A quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo é reduzida durante períodos de alta utilização de água pela planta.

O modelo SWAT divide a demanda de evaporação entre as diferentes camadas. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água que pode ser evaporada e calculada pela Equação (26):

$$E_{soil,z} = E_s'' * \frac{z}{z + \exp(2,374 - 0,00713 * z)} \quad (26)$$

Onde: $E_{soil,z}$ = demanda evaporativa na profundidade z (mm), E_s'' = evaporação máxima da água do solo em um determinado dia (mm) e z = profundidade abaixo da superfície.

Os coeficientes nessa equação foram selecionados do seguinte modo: 50% da demanda de evaporação seja extraída dos primeiros 10 mm de solo e 95% da demanda de evaporação seja extraída dos 100 mm de profundidade do solo.

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nos limites superior e inferior da camada do solo:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad (27)$$

Sendo: $E_{soil,ly}$ = demanda evaporativa para a camada ly (mm), $E_{soil,zl}$ = demanda evaporativa na delimitação inferior da camada do solo (mm) e $E_{soil,zu}$ = demanda evaporativa na delimitação superior da camada do solo (mm).

O SWAT não permite que uma camada diferente compense a incapacidade de outra camada em atender sua demanda evaporativa, portanto a demanda evaporativa não atingida por uma camada de solo resulta em uma redução na evapotranspiração real para a URH.

Um coeficiente foi incorporado na Equação (27) para permitir que o usuário modifique a distribuição da profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo. A equação modificada é:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} * esco \quad (28)$$

Em que: $esco$ = coeficiente de compensação da evaporação do solo. Soluções da Equação (28) para diferentes valores de $esco$ são plotados na Figura 10.

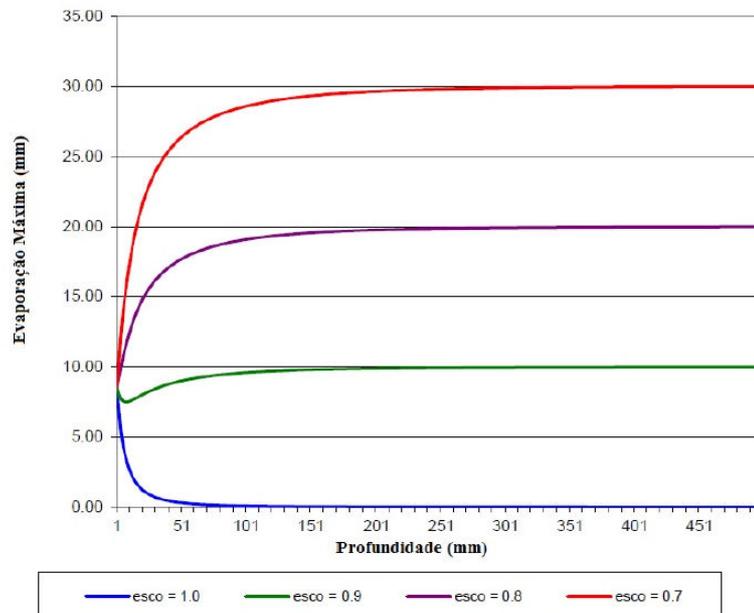


Figura 10 – Distribuição da demanda evaporativa do solo com profundidade
Fonte: Adaptado de Arnold et al. (2012a)

É possível observar que quando o valor de esco é reduzido, o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa de níveis mais baixos.

Quando a umidade de uma camada de solo está abaixo da capacidade de campo, a demanda evaporativa para a camada é reduzida de acordo com as seguintes equações:

$$E'_{soil,y} = E_{soil,y} * \exp\left(\frac{2,5 * (SW_{ly} - FC_{ly})}{FC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad \text{quando } SW_{ly} < FC_{ly} \quad (29)$$

$$E'_{soil,y} = E_{soil,y} \quad \text{quando } SW_{ly} \geq FC_{ly} \quad (30)$$

Onde: $E_{soil,ly}$ = demanda evaporativa da camada ly ajustada para a umidade de solo (mm), $E'_{soil,ly}$ = demanda evaporativa para a camada ly (mm), SW_{ly} = umidade do solo na camada ly (mm), FC_{ly} = umidade do solo da camada ly na capacidade de campo (mm) e WP_{ly} = umidade do solo na camada ly no ponto de murcha (mm).

Além de limitar a umidade do solo removida por evaporação em condições secas, o modelo SWAT define um valor máximo de água que pode ser retirada a qualquer momento. Esse valor máximo é de 80% de água disponível para a planta em um determinado dia na qual a água disponível da planta é definida como umidade total da camada do solo menos a umidade da camada do solo no ponto de murcha permanente (-1,5 MPa):

$$E''_{soil,y} = \min(E'_{soil,y} * 0,8 * (SW_{ly} - WP_{ly})) \quad (31)$$

Sendo: $E''_{soil,y}$ = quantidade de água removida da camada ly por evaporação (mm), $E'_{soil,y}$ = demanda evaporativa para a camada ly ajustada para a umidade do solo (mm), SW_{ly} = umidade do solo na camada ly (mm) e WP_{ly} = umidade do solo da camada ly no ponto de murcha (mm).

A água que penetra no solo pode escoar por uma ou várias rotas, ser absorvida pelo solo/plantas ou por evaporação, percolar para a base do perfil do solo e se realizar uma reposição aquífera ou se deslocar lateralmente no perfil e contribuir com o fluxo dos canais. De todas as formas supracitadas, a absorção da água é a que remove a maior parte da água que penetra no solo.

A componente percolação utiliza a técnica de propagação do armazenamento combinado com o modelo de fluxo na fenda do solo para predizer o fluxo através de cada camada de solo (LOPES, 2008). A percolação existe se a quantidade de água excede a capacidade de campo para cada camada, de modo que a próxima camada não esteja saturada.

O volume de água disponível para percolação em cada camada de solo é calculado conforme as equações a seguir:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad (32)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se} \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (33)$$

A água que percola abaixo da zona de raiz é armazenada como água subterrânea ou aparece como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. A técnica de propagação do armazenamento é baseada na seguinte Equação (34):

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} * (1 - \exp[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}]) \quad (34)$$

Sendo: $W_{perc,ly}$ = quantidade de água que percola na camada de solo em um determinado dia (mm), $SW_{ly,excess}$ = volume de água drenável na camada de solo em um determinado dia (mm), Δt = duração do intervalo de tempo (h) e TT_{perc} = tempo de duração da percolação (h).

A percolação não é permitida se a URH tiver um lençol freático sazonal elevado:

$$SW_{ly+1} \leq FC_{ly+1} + 0,5 * (SAT_{ly+1} - FC_{ly+1}) \quad (35)$$

Onde: SW_{ly+1} = umidade da camada subjacente (mm), FC_{ly+1} = umidade da camada de solo subjacente na capacidade de campo (mm) e SAT_{ly+1} = quantidade de água na camada de solo subjacente quando completamente saturada (mm).

O tempo gasto para a percolação é único para cada camada, sendo representado pela Equação (36):

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (36)$$

Sendo: TT_{perc} = tempo de duração da percolação (h), SAT_{ly} = quantidade de água na camada do solo quando completamente saturado (mm) e K_{sat} = condutividade hidráulica saturada para a camada (mm/h).

O escoamento lateral é importante em área com solos que possuem alta condutividade hidráulica nas camadas de superfície, e uma camada impermeável ou semi-impermeável com baixa profundidade. O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento sub-superficial baseado na equação do equilíbrio de massa líquida onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle – Equação (37).

$$Q_{lat} = 0,024 * \left(\frac{2 * SW_{ly,excess} * K_{sat} * slp}{\phi d * L_{hill}} \right) \quad (37)$$

Onde: Q_{lat} = escoamento lateral (mm/d), $SW_{ly,excess}$ = volume drenável de água armazenada na zona saturada da inclinação por unidade de área (mm), slp = declividade média da sub-bacia (% ou m/m), $\emptyset d$ = porosidade drenável do solo (mm/mm), e L_{hill} = comprimento da inclinação (m).

As águas subterrâneas são águas na zona de saturação dos materiais da terra sob pressão positiva. O modelo SWAT simula dois aquíferos: o raso que é um aquífero não confinado e contribui para o fluxo do canal principal ou para a extensão da sub-bacia e o aquífero confinado que penetra no aquífero profundo e contribui supostamente com o fluxo da água em algum ponto fora da bacia. O balanço hídrico para o aquífero raso é calculado pela Equação (38):

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (38)$$

Sendo: $aq_{sh,i}$ = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{sh,i-1}$ = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm), $w_{rchrg,sh}$ = quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm), Q_{gw} = fluxo da água subterrânea ou de base no canal principal no dia i (mm), w_{revap} = quantidade de água penetrando a zona do solo em resposta às deficiências de água no dia i (mm), e $w_{pump,sh}$ = quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm).

A água que se locomove pelo perfil do solo por percolação ou pelo fluxo de retorno, entra e flui por meio da zona vadosa antes de ocorrer a recarga do aquífero raso e/ou profundo. O atraso entre o momento em que a água sai do perfil do solo e entra no aquífero raso irá depender da profundidade do nível de água, das propriedades hidráulicas e de formações geológicas na zona vadosa e na água subterrânea.

A função de atraso ajusta situações em que a recarga para o aquífero não é instantânea, isto é, um dia ou menos. A recarga de ambos os aquíferos num dado dia é calculada por:

$$w_{rchrg,i} = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) * w_{seep} + \exp[-1/\delta_{gw}] * w_{rchrg,i-1} \quad (39)$$

Onde: $w_{rchrg,i}$ = recarga ao aquífero em um dia i (mm), δ_{gw} = tempo de atraso, ou o tempo de drenagem das formações geológicas (dia), w_{seep} = quantidade total de água que sai da parte inferior da perfil do solo no dia i (mm) e $w_{rchrg,i-1}$ = quantidade de recarga dos aquíferos no dia $i-1$ (mm).

A quantidade de água que será desviada do aquífero raso para o aquífero profundo em um determinado dia é:

$$w_{deep} = \beta_{deep} * w_{rchrg} \quad (40)$$

Em que: w_{deep} = a quantidade de água se locomovendo para o aquífero profundo no dia i (mm), β_{deep} = coeficiente de percolação do aquífero e w_{rchrg} = quantidade de recarga entrando em ambos os aquíferos no dia i (mm).

A quantidade de recarga para o aquífero raso é:

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg} - w_{deep} \quad (41)$$

Onde: $w_{rchrg,sh}$ = quantidade de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm).

Quando o aquífero raso não recebe nenhuma recarga, ou seja, encontra-se em estado estacionário pode ser calculado pela Equação (42):

$$Q_{gw} = \frac{8000 * K_{sat}}{L_{gw}^2} * h_{wtbl} \quad (42)$$

Onde: Q_{gw} = fluxo da água subterrânea ou fluxo de base para o canal principal no dia i (mm), K_{sat} = condutividade hidráulica do aquífero (mm/d), L_{gw} = distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m) e h_{wtbl} = altura do lençol freático (m).

O escoamento subterrâneo pode ser calculado de duas maneiras: a) quando ocorre recarga e b) quando não ocorre recarga, conforme demonstram as Equações (43) e (44):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} * \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t] + w_{rchrg,sh} * (1 - \exp[-\alpha_{gw} * \Delta t]) \quad (43)$$

se $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad (44)$$

se $aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$

Onde: Q_{gw} = fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia i (mm), $Q_{gw,i-1}$ = fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia $i-1$ (mm), α_{gw} = constante de recessão do escoamento de base (adimensional), Δt = intervalo de tempo (1 dia), $w_{rchrg,sh}$ = quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia i (mm), aq_{sh} = quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia i (mm) e $aq_{shthr,q}$ = limite do nível de água no aquífero raso para que possa ocorrer a contribuição das águas subterrâneas para o canal principal (mm).

As Equações (45) e (46) representam o escoamento subterrâneo quando não ocorre a recarga do aquífero:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} * \exp[-\alpha_{gw} * t] \quad (45)$$

se $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad (46)$$

se $aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$

Sendo: Q_{gw} = fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia i (mm), $Q_{gw,0}$ = fluxo da água subterrânea para o canal principal no início da recessão (tempo $t = 0$) (mm), α_{gw}

= constante de recessão de escoamento de base, t = tempo decorrido desde o início da recessão (dias) (valor igual a 1), $a_{q_{sh}}$ = a quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia i (mm) e $a_{q_{shthr,q}}$ = limite do nível de água no aquífero raso para que ocorra um contribuição de águas subterrâneas n canal principal (mm).

4.4 DADOS DE ENTRADA

Para aplicar o modelo SWAT é imprescindível a construção de um banco de dados, por isso é necessário reunir algumas informações denominadas dados de entrada (*input*) que se dividem em: planos de informação em formato *shapefile* (modelo digital de elevação – MDE, cobertura e uso do solo e tipos de solo) e dados tabulares (dados climatológicos – precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento – e os dados de vazão), conforme demonstra o Quadro 3.

Quadro 3 – Relação dos dados de entrada para modelagem no SWAT

Tipos de Dados de Entrada	Descrição
Planos de Informação (formato <i>shapefile</i>)	Modelo Digital de Elevação (MDE)
	Tipos de solo
	Cobertura e uso do solo
Dados Tabulares	Dados climatológicos (formato .txt)
	Dados de vazão

4.4.1 Planos de Informação

Os dados intitulados planos de informação são mapas temáticos que foram incluídos no SWAT através do ArcView, em formato raster (CARVALHO, 2014). Os subitens a seguir apresentam detalhes sobre a obtenção das informações para a geração das imagens e recomendações bibliográficas para obtenção de um melhor resultado na geração das imagens cartográficas.

i – Modelo Digital de Elevação – MDE

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido a partir do mapeamento pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizada gratuitamente no site de distribuição *EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) da *United States Geological Survey* (USGS). O SRTM foi uma parceria entre *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), sendo os produtos de elevação SRTM derivados dos dados de radar da imagem espacial banda C interferométrica, para geração de dados de elevação de superfície terrestre (USGS, 2017).

Os dados de elevação ou MDE são oferecidos na forma matricial com resolução de 1 arc-seg, portanto uma resolução espacial aproximada de 30 metros. O raster foi reprojetoado, assim como realizado no mapa de pedologia, para o sistema de coordenadas planas, UTM

Fuso 22 e *datum* horizontal SIRGAS2000. A eliminação de depressões, vazios ou erros do MDE disponibilizado pelo SRTM foi realizada no algoritmo *fill* (*Arctoolbox*) que preencheu as pequenas imperfeições nos dados e que corrige os eventuais erros de superfície no raster MDE. Assim, o arquivo *filled* foi utilizado de entrada no *software ArcSWAT*.

ii – Mapa Pedológico

A base de dados cartográfica temática produzida por Santos (2000) foi utilizada para obtenção da pedologia local da bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu Grande. A reprojeção do sistema de coordenadas do mapa de pedologia ocorreu no *software ArcGIS 10.3* a partir do algoritmo *project* contido no complemento *Arctoolbox*, sendo o sistema final projetado em coordenadas planas, Universal Transversa de Mercator – UTM fuso 22 com *datum* horizontal SIRGAS2000. A base vetorial foi convertida para o modelo matricial a partir do algoritmo *feature to raster*.

O mapa de pedologia obtido por Santos (2000) foi elaborado com base na reinterpretação, em imagem TM Landsat 5, dos contatos do mapa de solos do município de Palmas produzido por Ranzani (SANTOS, 2000) e classificado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 1999, além de observações qualitativas na área de estudo desse autor para o mapa produzido. Ao final, o raster foi georreferenciado a partir da base cartográfica da carta topográfica MI-1644 disponibilizada pela Secretaria de Planejamento e Orçamento do Estado do Tocantins – SEPLAN (TOCANTINS, 2017) e a classificação das tipologias de solos atualizadas para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2006 (EMBRAPA, 2006).

iii – Mapa de Cobertura e Uso do Solo

O pré-processamento, composição e classificação supervisionada de imagens de satélite deste trabalho foi realizado no *software SPRING v. 5*, enquanto as edições vetoriais para refinamento as informações produzidas ocorreram no *ArcGIS v. 10.3*.

Para elaboração do mapa temático de cobertura e uso da terra utilizou-se das imagens do satélite SENTINEL 2 administrado pela *European Space Agency* (ESA) no qual é portado do instrumento imageador MSI (*Multispectral Imager*) que oferece imagens ópticas de 10, 20 e 60 metros de resolução espacial para monitoramento da cobertura da terra (ESA, 2017). As imagens desse satélite são distribuídas gratuitamente no endereço eletrônico da ESA ou *EarthExplorer* da NASA, sendo adquiridas neste trabalho a imagem de coordenadas: -10,4389181; -48,6719496 de 29/11/2016 pelo endereço *EarthExplorer*.

As bandas espectrais originais foram convertidas para o formato ‘geotiff’ e posteriormente reprojetaadas para o *datum* SIRGAS 2000 no sistema de coordenadas planas UTM fuso 22, além do mais as bandas selecionadas apresentavam resolução espacial de 10m que consequente gerou um produto cartográfico na escala 1:50.000.

As bandas 2, 3 e 4 foram selecionadas para realização do arranjo em composição colorida da imagem para classificação do uso e cobertura do solo, dessa forma o fusão ocorreu com banda 4 (canal R), banda 3 (canal G) e banda 2 (canal B). A imagem colorida final foi registrada com os pontos de controle sobre a imagem do satélite LANDSAT5 do ano de 2007 georreferenciada, contida no banco de dados disponibilizado pela SEPLAN (TOCANTINS, 2007).

Após o registro, a imagem foi submetida ao realce por ampliação linear de contraste nas bandas da imagem para posteriormente a classificação supervisionada, apenas para a classe de agropecuária. As áreas urbanizadas na região foram extraídas manualmente na imagem de alta resolução do Laboratório de Estudos em Recursos Hídricos (LERH) – UFT (CHIESA, 2016 e COSTA, 2016). Por conseguinte, os polígonos de regiões fitoecológicas (TOCANTINS, 2013) foram unidos aos polígonos de agropecuária e áreas urbanizadas sendo preservados na união. Por fim, foi convencionado o agrupamento das classes de regiões fitoecológicas em campo, cerrado e mata. A base vetorial obtida foi convertida para o modelo matricial a partir do algoritmo *feature to raster* no *software ArcGIS v. 10*.

4.4.2 Dados Tabulares

Além dos planos de informação, também é indispensável inserir no SWAT os dados tabulares que se subdividem em: a) dados climatológicos, b) dados dos solos e c) dados para calibração e validação do modelo (no caso, os dados de vazão medidos). Maior detalhamento sobre a obtenção e manipulação destes dados é descrito nos subitens a seguir.

Conforme explanado anteriormente, o modelo SWAT pode estimar a evapotranspiração potencial por três métodos: a) Hargreaves, b) Priestley-Taylor e c) Penman-Monteith. O presente trabalho adotou o método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração potencial que exige dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Esse método combina componentes que levam em conta a energia necessária para sustentar a evaporação, a força do mecanismo requerido para remover o vapor d’água e os termos aerodinâmicos e de resistência da superfície sendo recomendado pela FAO/ONU (CARVALHO, 2014).

i – Dados Climáticos

O conjunto de dados climatológicos (séries históricas de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) é utilizado para alimentar o gerador climático do modelo SWAT (WXGEN).

Para a obtenção dessas informações é importante adquirir dados de séries históricas confiáveis, por isso a definição das estações deve seguir dois critérios: a série de dados relativos à pluviometria deve ser superior a 10 anos e as estações devem estar localizadas na mesma isozona (PONTES & FERNANDES, 2002).

Foram utilizados os dados registrados pelas estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, conforme detalhado no Quadro 4. As informações registradas pelas diversas estações do referido órgão são disponibilizadas pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP que dispõe de dados horários, diários e mensais em formato digital, em conformidade com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Quadro 4 – Dados das estações meteorológicas convencionais do INMET

Código	Coordenadas		Altitude (m)	Período Utilizado	Município
	Latitude	Longitude			
83033	-10°11'24" S	-48°18'0" W	280,00	01/1997 a 12/2015	Palmas
83064	-10°42'36" S	-48°24'36" W	239,20		Porto Nacional

Além dos dados registrados pelas estações meteorológicas, também foram utilizados os dados pluviométricos fornecidos por meio do *site* da Agência Nacional das Águas – ANA pelo do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb), conforme apresenta o Quadro 5.

Quadro 5 – Informações sobre as estações pluviométricas da ANA

Código	Coordenadas		Altitude (m)	Período Utilizado	Município
	Latitude	Longitude			
1048003	-10°43'0" S	-48°25'0" W	280,00	01/1997 a 12/2015	Porto Nacional
1048005	-10°18'48" S	-48°09'45" W	406,00		Taquaruçu do Porto

A Figura 11 demonstra a localização das estações meteorológicas e pluviométricas. Ressalta-se que as estações meteorológicas do INMET (Palmas – 83033) e Porto Nacional – 833064) não estão inseridas dentro da Bacia do Ribeirão Taquaruçu (distam cerca de 17,2 km e 53,6 km do centro geométrico da bacia, respectivamente). Contudo, a definição dessas estações se deu por serem as mais próximas da bacia supramencionada e por disponibilizar uma série histórica superior a 10 anos.

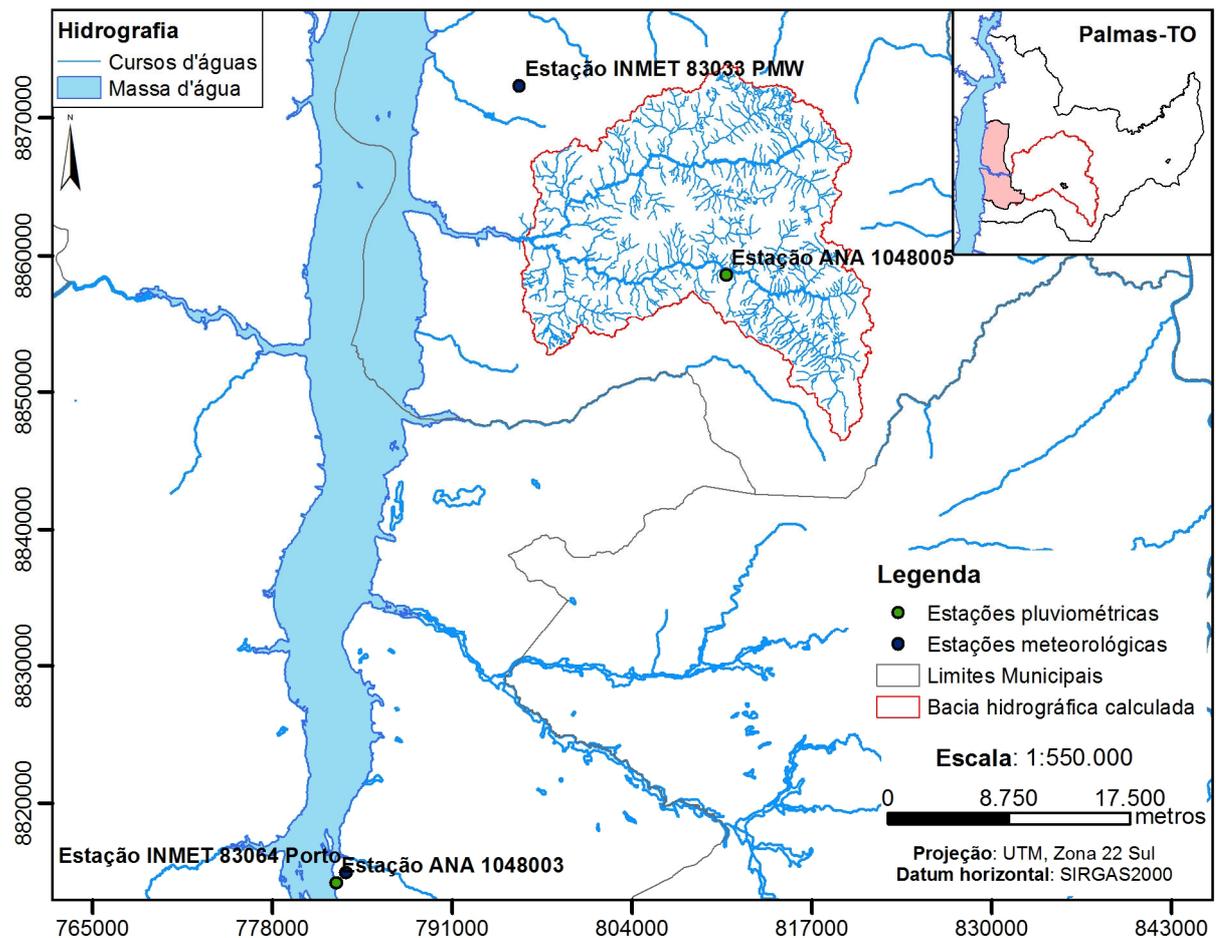


Figura 11 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas

O modelo SWAT requer dados médios mensais de parâmetros meteorológicos para o gerador climático (BALDISSERA, 2005) e com essas informações o modelo calcula, entre outras variáveis, a evapotranspiração (CARVALHO, 2014).

É válido mencionar que todos os parâmetros utilizados pelo gerador climático (WXGEN) foram calculados conforme recomendação do manual Input/Output (ARNOLD et al., 2012a). Ressalta-se que as estimativas de dados de precipitação foram calculadas com o programa computacional pcpSTAT.

Dentre os vários dados climáticos mensais requeridos pelo modelo SWAT encontra-se a precipitação máxima em meia hora (RAINHHMX), porém as estações utilizadas no presente estudo disponibilizam registros diários de precipitação. Entretanto a partir de chuvas diárias podem-se obter chuvas de 24 horas de duração com determinada frequência e desagregá-las para durações menores utilizando as relações propostas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (CARDOSO et al., 1998). O parâmetro RAINHHMX foi calculado após identificar os maiores valores diários de

precipitação para cada mês do período de dados para posteriormente serem utilizados os fatores para desagregação de chuvas indicados pela CETESB, conforme indicado pelo autor supramencionado. O Quadro 6 exibe os parâmetros requeridos pelo modelo enquanto o Apêndice exibe os respectivos resultados dos parâmetros requeridos pelo gerador climático WXGEN.

Quadro 6 – Parâmetros requeridos pelo modelo SWAT

Parâmetros	Descrição
Geral	
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus).
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus).
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros).
Temperatura	
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C).
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C).
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês (°C).
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês (°C).
Precipitação	
PCPMM	Média da precipitação do mês (mm).
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm dia ⁻¹).
PCPSKW	Coefficiente <i>Skew</i> para a precipitação diária nomes.
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês.
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês.
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês.
RAINHHMX	Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm).
RAIN_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados que foram utilizados para calcular o RAINHHMAX.
Outros	
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ m ⁻² dia ⁻¹).
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C) ou umidade relativa (fração).
WNDVAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m s ⁻¹).

Fonte: Arnold et al. (2012a)

Tendo em vista que as estações meteorológicas do INMET disponibilizam o parâmetro insolação foi necessário efetuar os cálculos descritos em Allen et al. (1998) para obtenção da radiação solar diária e posterior média mensal. Segundo o autor, a radiação solar (R_s) pode ser calculada com a fórmula de Angstrom que relaciona a radiação solar com a radiação extraterrestre e a duração relativa da luz do sol, conforme Equação (47).

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (47)$$

Onde: R_s = radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹), n = duração real do sol (hora), N = duração máxima possível da luz do sol ou do dia (hora), n/N = duração relativa do sol (adimensional),

R_a = radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); a_s = constante de regressão, expressando a fração de radiação extraterrestre chegando à terra em dias nublados ($n = 0$) e $a_s + b_s$ = fração de radiação extraterrestre atingindo a terra em dias claros ($n = N$). Para a_s e b_s são recomendados os valores 0,25 e 0,50, respectivamente.

A radiação extraterrestre (R_a) para cada dia do ano e para diferentes latitudes pode ser estimada a partir da constante solar, da declinação solar e da época do ano (Equação 48):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (48)$$

Sendo: R_a = radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G_{sc} = constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); d_r = distância relativa inversa Terra-Sol – Equação 50; ω_s = ângulo da hora do sol (rad) – Equação 52; φ = latitude (rad) – Equação 49; δ = declinação solar (rad) – Equação 51.

A conversão de graus decimais em radianos é dada por:

$$\text{Radianos} = \frac{\pi}{180} [\text{grausdecimais}] \quad (49)$$

A distância relativa inversa Terra-Sol (d_r) e a declinação solar (δ) são dadas pelas Equações 50 e 51:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (50)$$

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (51)$$

Onde: J = número do dia no ano entre 1 (1 de janeiro) e 365 ou 366 (31 dezembro).

O ângulo da hora do sol (ω_s) é dado pela Equação 52:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (52)$$

Sendo φ = latitude (rad); δ = declinação solar (rad).

O modelo também utiliza dados diários de precipitação (mm), temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar incidente ($\text{MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa do ar (%). Contudo a alimentação dos dados meteorológicos diários no SWAT é opcional uma vez que o próprio programa pode simular os valores a partir dos dados climatológicos mensais, os quais são obrigatórios serem inseridos no modelo (CARVALHO, 2014). No presente estudo foram utilizados os dados diários disponibilizados pelas estações meteorológicas do INMET e pelas estações pluviométricas da ANA, sendo todos devidamente organizados conforme a forma requerida pelo SWAT (formato .txt).

ii – Dados de Solo

O modelo hidrológico SWAT possui seu próprio banco de dados, porém como o *software* foi elaborado e desenvolvido nos Estados Unidos as informações disponibilizadas pelo programa são relativas aos solos norte-americanos o que torna imprescindível a alimentação do banco de dados do programa com as características físicas e químicas dos solos brasileiros. Todas as informações exigidas pelo SWAT estão elencadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Dados de solos exigidos pelo modelo

Dados	Parâmetro	Descrição
Tipo de solo	SNAM	Classificação do solo (nome dado a cada classe).
	NLAYERS	Número de <i>layers</i> de informação (número de horizontes).
	HYDGRP	Grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C ou D).
	SOL_ZMX	Profundidade máxima do solo que a raiz alcança (mm).
	ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (fração) – opcional.
Camadas	SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm).
	SOL_BD	Densidade do solo (g/cm).
	SOL_AWC	Capacidade de água do solo (mm/mm).
	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/hr).
	SOL_CBN	Conteúdo do carbono orgânico do solo (% peso solo).
	CLAY	Porcentagem de argila no solo (% peso solo).
	SAND	Porcentagem de areia no solo (% peso solo).
	SILT	Porcentagem de silte no solo (% peso solo).
	ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (% volume).
	SOL_ALB	Albedo do solo (fração).
	USLE_K	Fator de erodibilidade do solo (0,013 tm ² hr/m ³ tcm).
	SOL_EC	Condutividade elétrica (dS/cm).

Fonte: Arnold et al. (2012a)

iii – Dados de Vazão

Para a calibração e validação do modelo foram utilizados os dados de vazão disponibilizados pelo BRK Ambiental referente a duas estações fluviométricas localizadas no Ribeirão Taquaruçuzinho e Taquaruçu Grande (Quadro 8), cujo período disponibilizado foi de abril de 2013 a agosto de 2015.

Quadro 8 – Informações sobre as estações fluviométricas para calibração do modelo

Estação	Código	Coordenadas		Corpo Hídrico	Período
		Latitude	Longitude		
BTG	00022013	-10°17'13,95"S	-48°16'45,68"W	Taquaruçu Grande	04/2013 a 08/2015
BTP	00032013	-10°17'46,80"S	-48°17'16,76"W		

Os dados de vazão são utilizados na fase de pós-processamento – calibração e validação (CASTRO, 2013), a Figura 12 demonstra a localização das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

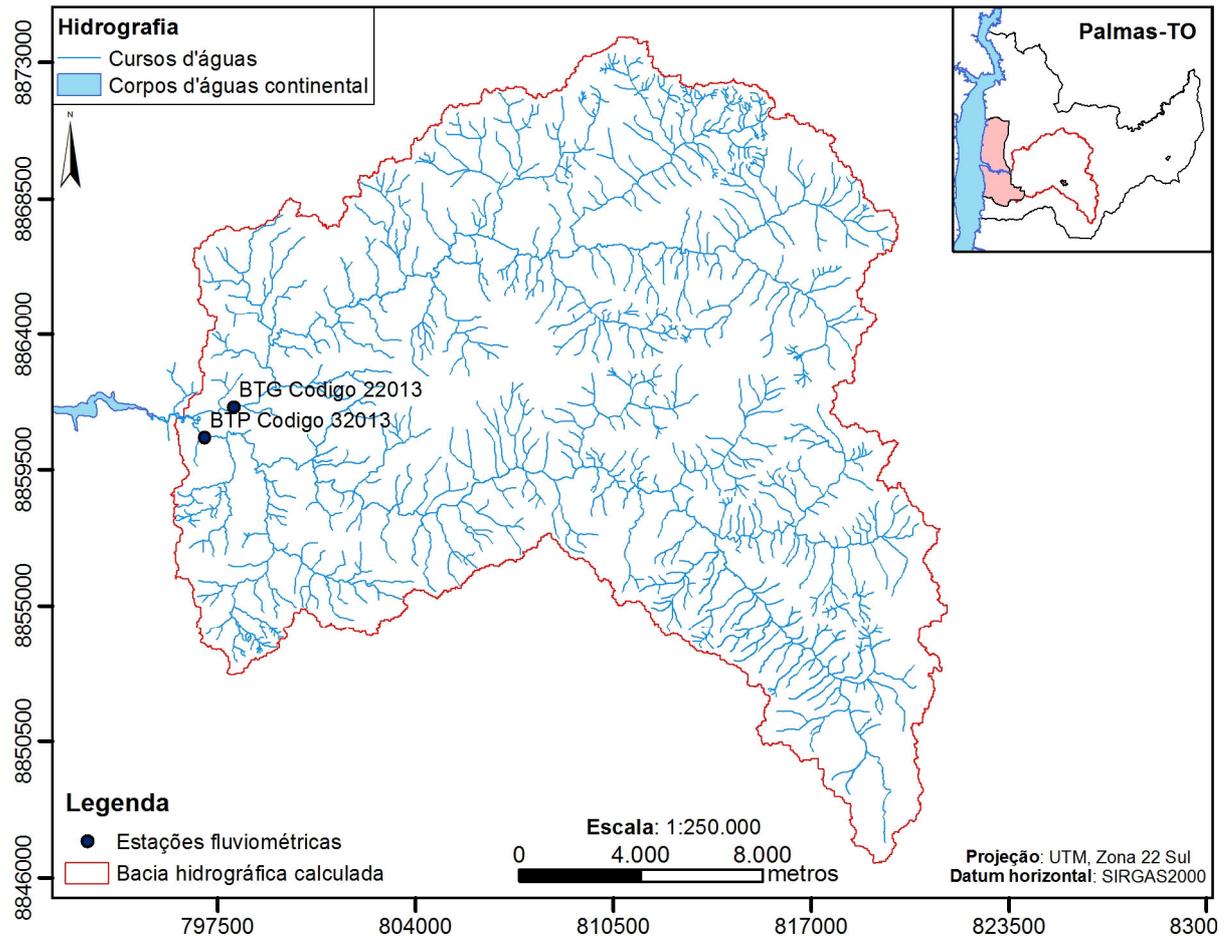


Figura 12 – Localização das estações fluviométricas

4.4.3 Parametrização dos Dados

A parametrização é o processo de estabelecimento de valores das propriedades físicas de cada componente essencial para a modelagem (FERRIGO, 2014). Neste estudo, foi necessária a parametrização para o clima, as classes de solo e tipos de uso do solo tendo em vista os objetivos propostos pelo presente trabalho, a escassez de alguns dados relativos à área de estudo e a limitação de recursos financeiros.

A parametrização das classes de solo foi fundamentada primordialmente pelo trabalho de Lima et al. (2013) que teve como objetivo o desenvolvimento de base de dados de solos do cerrado para aplicações no SWAT, exceto pelo neossolo flúvico e neossolo litólico que foram parametrizados por Baldissera (2005). Para os valores do potencial de faturamento (SOL_CRK) admitiu-se um valor de 0,5 que é o *default* (valor de referência padrão) do modelo enquanto que para os valores de albedo (SOL_ALB) e a fração de porosidade (ANION_EXCL) foram utilizados como referência os valores adaptados de Baldissera (2005), a relação dos parâmetros de solo é apresentada no Anexo.

Ressalta-se que esta parametrização foi necessária devido à ausência de dados locais, curto espaço de tempo aliado aos altos recursos financeiros exigidos para as análises realizadas em campo. Santos (2010) ressalta que a aproximação pode afastar da realidade os resultados retornados pelas simulações com o SWAT.

O modelo exige um grande número de informações acerca das classes de uso para poder realizar suas iterações, porém a maioria das bacias brasileiras não tem esses dados disponíveis (CASTRO, 2013). Devido ao fato da bacia em questão não possuir os dados, foi necessário realizar analogia entre os tipos de usos identificados na bacia com as classes presentes no banco de dados do SWAT. Ressalta-se que os valores de CN2 foram alterados para as condições brasileiras de acordo com o trabalho de Sartori (2004).

4.5 APLICAÇÃO DO SWAT

O modelo hidrológico SWAT requer a execução sequencial de etapas que se inicia com a inserção de dados no modelo que processa os dados de entrada e gera resultados parciais, antes da simulação propriamente dita. Após a simulação, o usuário deve proceder às etapas de pós-processamento, desde que haja dados observados das variáveis de interesse. 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).

Diante de todo o exposto, a Figura 13 demonstra as etapas efetuadas para execução do modelo.

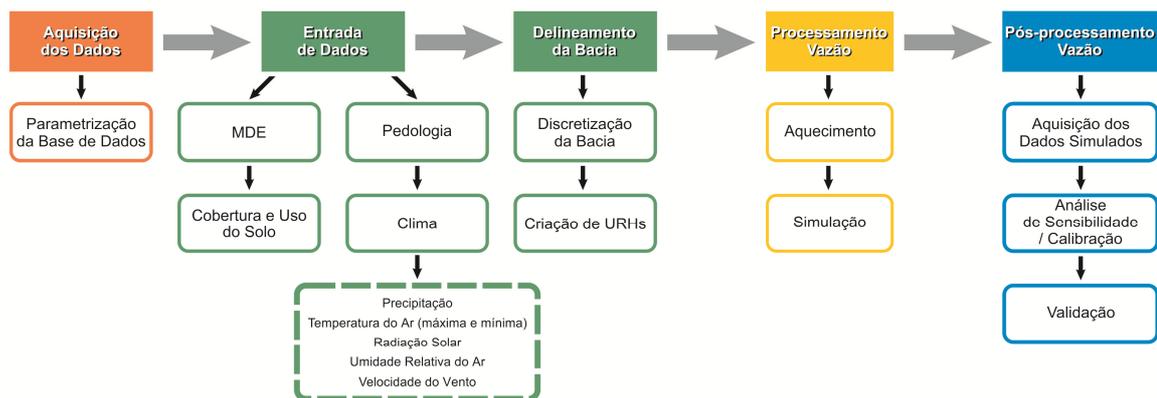


Figura 13 – Fluxograma metodológico do trabalho

4.5.1 Delineamento e Discretização da Bacia

O programa SWAT requer informações para o processo de simulação em três níveis de escala espacial: bacia hidrográfica, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica – URHs (MELO NETO, 2013).

Segundo Neitsch et al. (2011), o uso de sub-bacia na simulação é benéfico quando áreas da bacia hidrográfica são caracterizadas por usos e solo com características diferentes a ponto de impactar a hidrologia. Dessa forma, o modelador pode consultar diferentes áreas da bacia com outra visão espacial.

De acordo com Melo Neto (2013) no programa computacional SWAT a rede de drenagem é definida a partir do acúmulo de células que convergem para um mesmo ponto, sempre de cota inferior às células que drenam até ele, onde um valor mínimo é especificado para possibilitar a formação dos canais de drenagem.

O delineamento foi realizado de forma automática a partir do MDE com a utilização de um mapa da rede hidrográfica da bacia (opção *burn in* do programa) do banco de dados do Laboratório de Estudos em Recursos Hídricos (LERH) – UFT, cujo intuito foi gerar uma rede de drenagem mais próxima do referido mapa, o que impele a geração da rede de drenagem artificial (SALLES, 2012).

4.5.2 Definição de Unidades de Respostas Hidrológicas

Neitsch et al. (2011) explana que as Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs) são áreas acidentadas dentro de sub-bacias que são formadas por uma única cobertura de terra, solo e combinações de gestão. Sendo o escoamento intencionalmente separado para cada URH e direcionado para que seja obtido um valor total de escoamento para a bacia hidrográfica o que aumenta a precisão e fornece uma descrição física melhor do equilíbrio hídrico.

Após a inserção dos mapas de solo e cobertura e uso, o SWAT gera o mapa de declividade de forma automática, calculado por meio da análise da taxa máxima de mudança entre um pixel e seus vizinhos (CASTRO, 2013). Deve ser definido pelo usuário o número de classes de declividade e o valor de intervalo de cada classe, neste trabalho foram adotadas cinco classes de declividade que é a quantidade máxima permitida pelo programa (0% a 8%, 8 a 20%, 20% a 45%, 45% a 75% e 75% até o valor máximo – 999%). Após definição das classes de declividade, o programa realiza a sobreposição dos planos de informação para gerar as URHs.

O modelo possui três critérios de geração de URHs: 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 (BUENO et al., 2017). No presente estudo optou-se pela última opção (múltiplas URHs), mantendo todos os tipos de solo, uso e declividade.

4.5.3 Definição do Período de Simulação

O modelo SWAT necessita que o período dos dados de precipitação coincida com o período dos dados climatológicos (RODRIGUES & REIS, 2007), portanto o período de simulação máximo permitido ao usuário é determinado pela abrangência dos dados climáticos (CARVALHO, 2014).

Assim considerando o exposto acima, foi definido o período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2015 uma vez que neste intervalo de tempo os dados requeridos pelo modelo estavam todos disponíveis.

i – Período de Aquecimento

É necessário para execução do modelo SWAT considerar um período de aquecimento (*warm up*), um para a calibração e outro para a validação (CASTRO, 2013). O período de aquecimento é o procedimento de definir uma determinada parcela inicial do tempo de simulação e excluí-la do resultado final, isto é, as simulações feitas neste período serão realizadas, porém não influirão nos valores da função objetivo escolhida, portanto servem somente para preservar as variáveis de estado da influência das condições iniciais (CARVALHO, 2014).

Arnold et al. (2012a) recomenda que seja efetuado um período de aquecimento de um ano ao efetuar simulações com dados de cinco anos ou menos com o intuito de garantir que o ciclo hidrológico seja simulado adequadamente. Desta forma, considerando os dados de vazão foi adotado para o aquecimento do modelo o período de dezesseis anos (1997 a 2012).

4.5.4 Simulação Inicial

A simulação inicial, ou seja, simulação sem calibração foi avaliada no período de 04/2013 a 07/2014 pela comparação gráfica e análise estatística com o intuito de analisar tanto visualmente quanto estatisticamente o comportamento da vazão simulada pelo modelo, além de possibilitar a comparação com a vazão observada.

Esta etapa pode apontar se a simulação apresenta resultados satisfatórios o que torna dispensável o processo de calibração, porém também pode indicar que o modelo e a

parametrização inicial são insuficientes para gerar respostas aceitáveis estatisticamente (FERRIGO, 2014).

Logo, essa etapa permite interpretar o comportamento hídrico simulado indicando quais ações necessitam ser realizadas para que sejam minoradas as possíveis falhas na simulação.

4.5.5 Análise de Sensibilidade

A primeira etapa para o processo de calibração e verificação do modelo é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica em estudo que deve ser realizada com base em opinião especializada e/ou análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade é o processo de determinação da taxa de mudança dos dados de saídas do modelo em relação aos parâmetros (ARNOLD et al., 2012b).

Jha (2009) explana que, devido ao grande número de parâmetros de entrada no modelo, é importante que se identifiquem os parâmetros que mais influenciam no modelo e sua importância nos resultados gerados, ou seja, qual a intensidade que cada alteração provoca no modelo, de forma que se possa dar ênfase maior à aquisição e ao refinamento desses parâmetros e, assim, diminuir as incertezas e aumentar a garantia dos resultados gerados.

A análise de sensibilidade deve ser associada à calibração com o objetivo de extrair o máximo das potencialidades e recursos do modelo conduzindo à melhor consistência dos dados gerados e à consequente aplicabilidade na área em estudo ou sua extrapolação para outras áreas semelhantes (LELIS et al., 2012).

A análise de sensibilidade e calibração foi realizada pelo SWAT-CUP, versão 5.1.6.2, *software* desenvolvido por Abbaspour (2015). Castro (2013) explica que a análise de sensibilidade pode ser conduzida com o uso dos dados observados ou utilizando como base os valores simulados pelo SWAT, neste estudo foram utilizados os dados observados referentes ao mesmo período proposto para a calibração (04/2013 a 07/2014).

O SWAT-CUP possui três métodos para definir a alteração dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos: a substituição direta, onde o modelo substitui o valor inicial pelo valor informado, por adição, em que o valor informado é somado ao valor inicial do parâmetro e por multiplicação, onde o valor inicial é multiplicado por $(1 + \text{valor informado})$, resultando em variação percentual (ABBASPOUR, 2015).

De acordo com Abbaspour (2015) a análise de sensibilidade no SWAT, método SUFI-2, é tradicionalmente feita com a união de dois métodos estatísticos no processamento:

Latin Hypercube simulations (LH) e *One factor at a time sampling* (OAT), formando o método LH-OAT.

Ressalta-se que o programa permite dois tipos de análise de sensibilidade: global e individual que foram sucintamente descritas a seguir, conforme Abbaspour (2015). Na análise de sensibilidade global, a determinação da sensibilidade dos parâmetros é determinada pelo cálculo do sistema linear de regressão múltipla. Um *t-test* é então usado para identificar a significância relativa de cada parâmetro e a sensibilidade é estimada pelas mudanças médias na função objetivo, resultante das alterações em cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros também são alterados. Essa sensibilidade relativa determinada é baseada numa aproximação linear e, conseqüentemente, fornece somente informações parciais sobre a sensibilidade dos parâmetros do modelo na função objetivo (ABBASPOUR, 2015).

Conforme descrito no manual do SWAT-CUP, o programa apresenta dois resultados em relação à análise de sensibilidade global: o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro; e o *p-value* que determina a significância da sensibilidade, e um valor próximo a zero indica maior significância. Neste estudo, os dois resultados foram avaliados.

A análise de sensibilidade individual mostra a sensibilidade das mudanças do parâmetro na variável em análise, enquanto todos os outros parâmetros são mantidos constantes. Contudo, o problema desse método é que o usuário não sabe qual é o valor constante dos outros parâmetros, sendo uma importante consideração quando a sensibilidade de um parâmetro depende do valor de outro (ABBASPOUR, 2015).

4.5.6 Calibração e Validação

A calibração é o ajuste dos parâmetros do modelo, de modo que a primeira etapa na calibração de modelos é separar a série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e outro para validação do modelo (LOPES, 2008).

No período de calibração os parâmetros do modelo são variados até que um ajuste aceitável é obtido. Assim, o modelo é executado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste será determinado (ARNOLD et al., 2000). Uma vez calibrados os parâmetros do modelo deve ser realizada a validação para situações semelhantes às que se quer aplicá-lo. Os resultados da verificação irão indicar se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração (MACHADO, 2002).

Segundo Carvalho (2014), as versões mais recentes do modelo SWAT eliminaram os dispositivos automáticos de pós-processamento, tendo mantido somente as formas manuais.

Logo, para realizar automaticamente a análise de sensibilidade é necessário utilizar programa específico como é o caso do SWAT-CUP que possibilita efetuar a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas do SWAT e por isso possui vários algoritmos de otimização como: SUFI2 – *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm*, PSO – *Particle Swarm Optimization*, PARASOL – *Parameter Solutions*, GLUE – *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* e MCMC – *Markov Chain Monte Carlo* (ABBASPOUR, 2015).

A calibração da vazão pelo modelo foi realizada automaticamente (também chamada de auto-calibração) com a utilização do aplicativo SWAT-CUP 2012, v. 5.1.6.2, desenvolvido por Abbaspour (2015) em período diário. O algoritmo de autocalibração utilizado foi o *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm* (SUFI-2) que é o de maior uso para a calibração automatizada do modelo SWAT, segundo Ferrigo (2014).

Assim, os períodos de dados para calibração e validação do modelo foram de 04/2013 a 07/2014 e 08/2014 a 08/2015, respectivamente. Assim, o Quadro 9 demonstra resumidamente de que forma foram utilizados os períodos com dados disponíveis na etapa de processamento e pós-processamento.

Quadro 9 – Relação dos períodos de dados na fase de processamento e pós-processamento

Período dos Dados	Utilização	Etapa
01/1997 a 12/2015	Dados climáticos e pluviométricos	Processamento
01/1997 a 12/2012	Aquecimento	
04/2013 a 07/2014	Análise de Sensibilidade e Calibração	Pós-processamento
08/2014 a 08/2015	Validação	

4.5.7 Análise de Desempenho do Modelo

Os resultados da modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu foram analisados com base nos hidrogramas (observados e simulados), sendo o desempenho do SWAT avaliado por meio de análises estatísticas.

Para tanto, foram utilizadas duas funções objetivo: eficiência de Nash-Sutcliffe (*Nash-Sutcliffe Efficiency* – NSE) e o coeficiente de determinação (R^2), sendo estas estatísticas amplamente utilizadas em estudos relativos à modelagem computacional que envolvem o uso do programa SWAT (MALUTTA, 2012; CASTRO, 2013; MELO NETO, 2013; BELLON, 2014; FERRIGO, 2014; ANTUNES, 2015; FERNANDES, 2015; TESCH, 2015).

O NSE é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição (FERRIGO, 2014), podendo variar do negativo infinito ($-\infty$) a 1, sendo este último valor o indicativo de

perfeito ajuste. Segundo Uzeika (2009), este coeficiente indica o quanto os pontos do gráfico de eventos observados *versus* eventos simulados se aproximam de uma linha com inclinação 1:1, sendo calculado pela Equação (53):

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (53)$$

Onde: Q_{sim} = vazão simulada; Q_{obs} = vazão observada, $\overline{Q_{obs}}$ = média da vazão observada. Moriasi et al. (2007) afirma que valores entre 0 e 1 são comumente vistos como níveis aceitáveis de performance do modelo, enquanto valores menores que 0 indicam um desempenho inaceitável do modelo.

O coeficiente de determinação, expresso pela Equação (54), mostra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados. O R^2 varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro (FERRIGO, 2014).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (54)$$

Sendo: Q_{obs} = vazão observada; $\overline{Q_{obs}}$ = média da vazão observada, Q_{sim} = vazão simulada, $\overline{Q_{sim}}$ = média da vazão simulada.

Os demais testes estatísticos como razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR), percentual de tendência (PBIAS) e o índice de Nash-Sutcliffe alterado que considera a vazão média mensal inter-anual (COEA) não foram utilizados, pois não há um valor de referência que aponte um valor satisfatório para a calibração com dados diários (CASTRO, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DADOS DE ENTRADA

5.1.1 Modelo Digital de Elevação – MDE

O modelo digital de elevação gerado indica que a altitude da bacia hidrográfica varia entre 225 m até 717 m (Figura 14), com elevação média de 499,92 m.

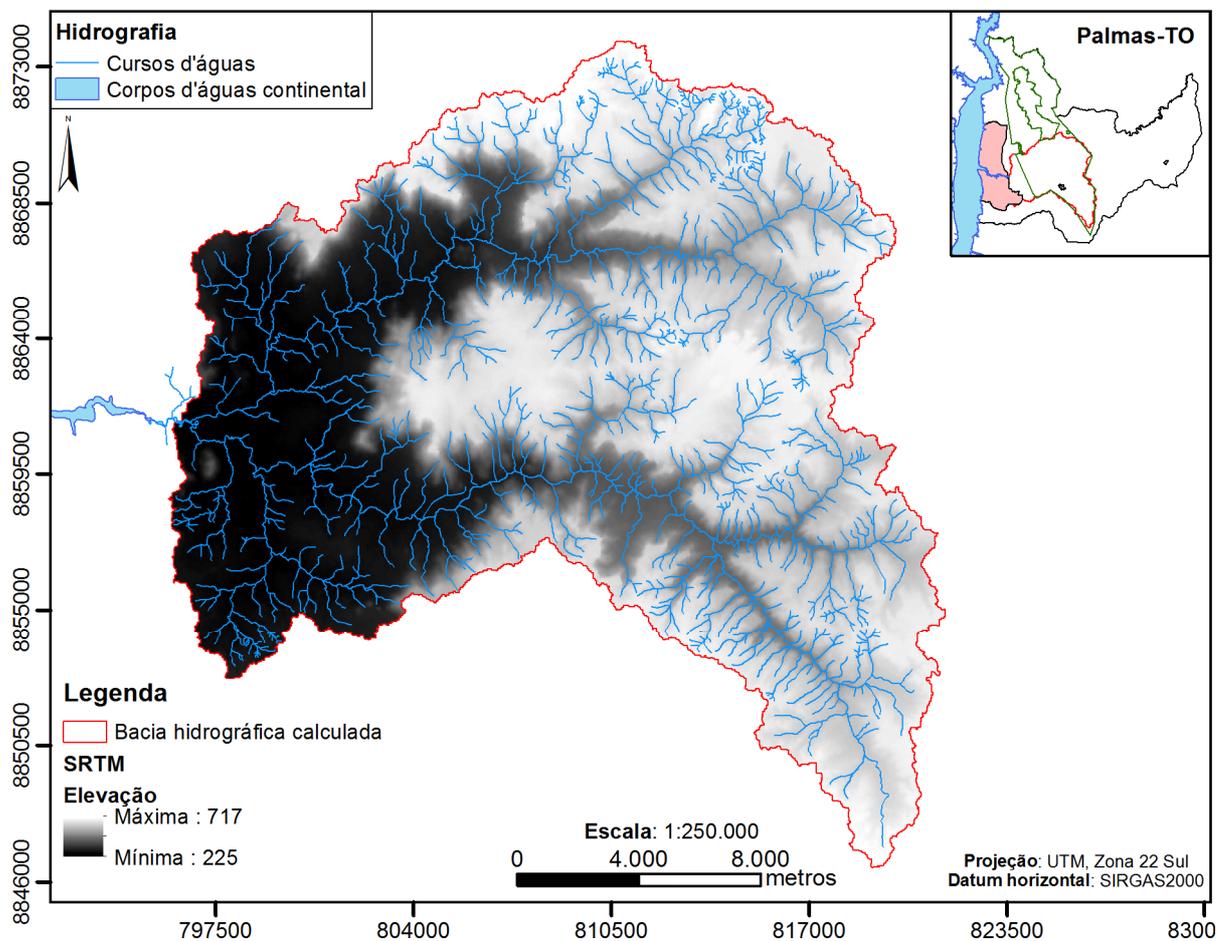


Figura 14 – Modelo Digital de Elevação gerado.

5.1.2 Pedologia

A pedologia da região é composta por latossolo vermelho-amarelo (71,20%), cambissolo (22,78%), latossolo vermelho (3,33%), plintossolo (1,09%), neossolo flúvico (0,97%) e neossolo litólico (0,63%), conforme demonstra a Figura 15.

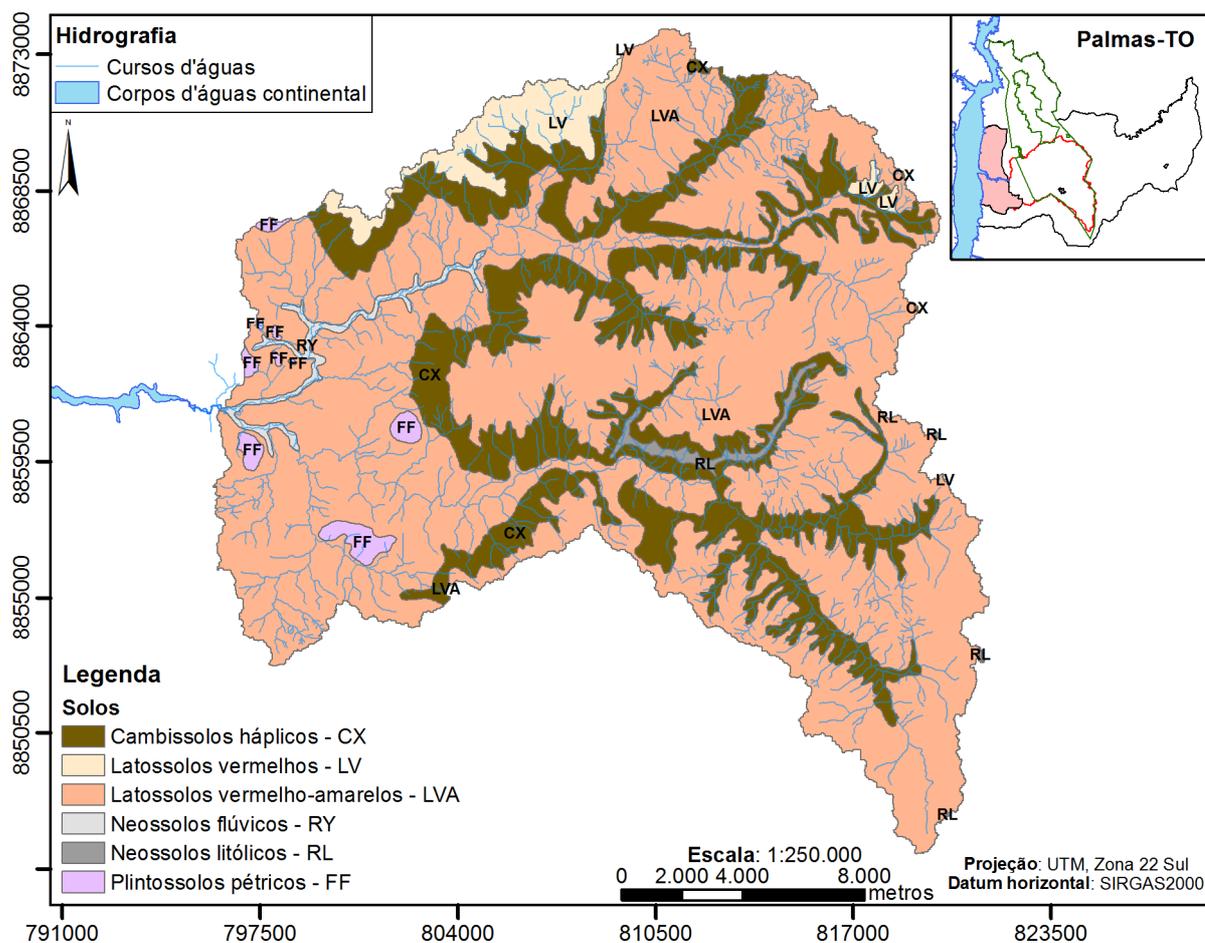


Figura 15 – Mapa pedológico (reclassificado)

5.1.3 Cobertura e Uso do Solo

O mapeamento da bacia resultou em 09 classes de uso definidas de acordo com as características de ocupação da bacia (Figura 16). O Quadro 10 apresenta o tipo de uso do solo e a respectiva área ocupada, em hectares e porcentagem.

Quadro 10 – Cobertura e uso do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu

Uso do Solo	Área (ha)	Área (%)
Floresta Estacional	10856,08	27,42
Formações Florestais de Cerrado	3708,20	9,37
Cerrado Sentido Restrito	12994,42	32,82
Formações Campestres	1910,77	4,83
Agropecuária	9286,51	23,45
Área Urbanizada	810,67	2,05
Mineração	9,12	0,02
Solo Exposto	11,02	0,03
Corpos D'águas Continentais	6,84	0,02

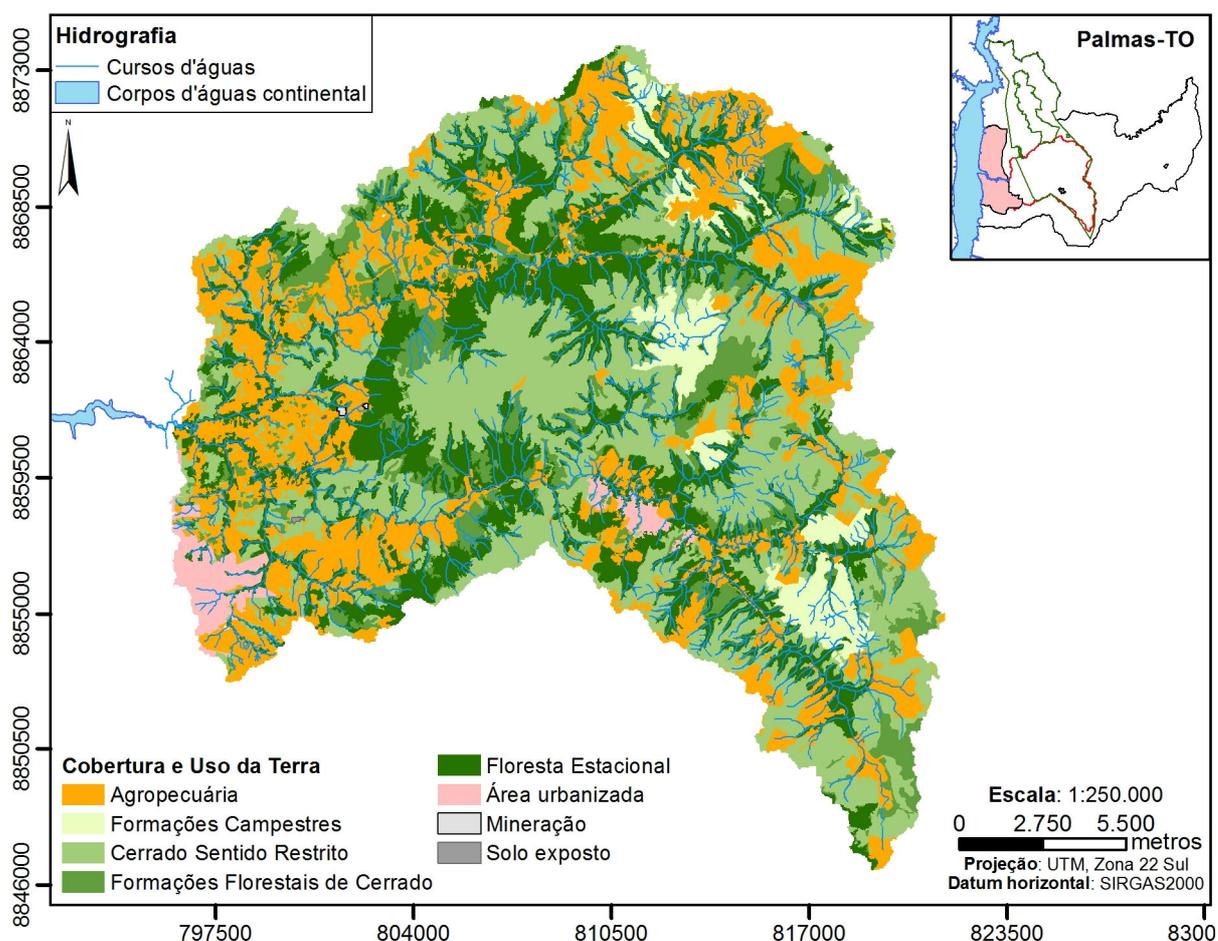


Figura 16 – Mapa de cobertura e uso do solo

Os valores de CN2 foram alterados para as condições brasileiras de acordo com o trabalho de Sartori (2004), conforme Quadro 11.

Quadro 11 – Valores de CN2 adaptados de Sartori (2004)

Uso do Solo	Banco de dados SWAT	A	B	C	D
Floresta Estacional	FRSD	25*	40	49	52
Formações Florestais de Cerrado	FRST	39	61	74	80
Cerrado Sentido Restrito	RNGB	39	61	74	80
Formações Campestres	RNGE	39	61	74	80
Agropecuária	PAST	49	69	79	84
Área Urbanizada	URMD	68	79	86	89
Mineração	BARR	59	74	82	86
Solo Exposto	AGRC				

* O valor indicado por Sartori (2004) é 20, porém o mínimo permitido pelo SWAT é 25.

Fonte: Adaptado de Sartori (2004)

O uso e ocupação do solo foram denominados de acordo com a nomenclatura do banco de dados do SWAT: floresta estacional (*Forest-Deciduous - FRSD*), formações florestais de cerrado (*Forest-Mixed - FRST*), cerrado sentido restrito (*Range-Brush - RNGB*),

formações campestres (*Range-Grasses - RNGE*), agropecuária (*Pasture - PAST*), área urbanizada (*Residential-Medium Density - URMD*), mineração (*Barren - BARR*), solo exposto (*Agricultural Land-Close-grown - AGRC*) e corpos d'águas continentais (*Water - WATR*).

5.1.4 Dados Climáticos

Os gráficos abaixo (Figura 17 e Figura 18) permitem notar duas estações bem definidas: a estação de seca e a estação chuvosa, onde a primeira acontece de maio a setembro com precipitações variando de 30,70 mm no mês de maio a 25,12 mm em setembro (ambos os dados da estação INMET Porto). Já a estação chuvosa ocorre de outubro a abril variando de 193,31 mm (Estação ANA Palmas, em janeiro) a 67,04 mm (estação INMET Porto, mês de outubro).

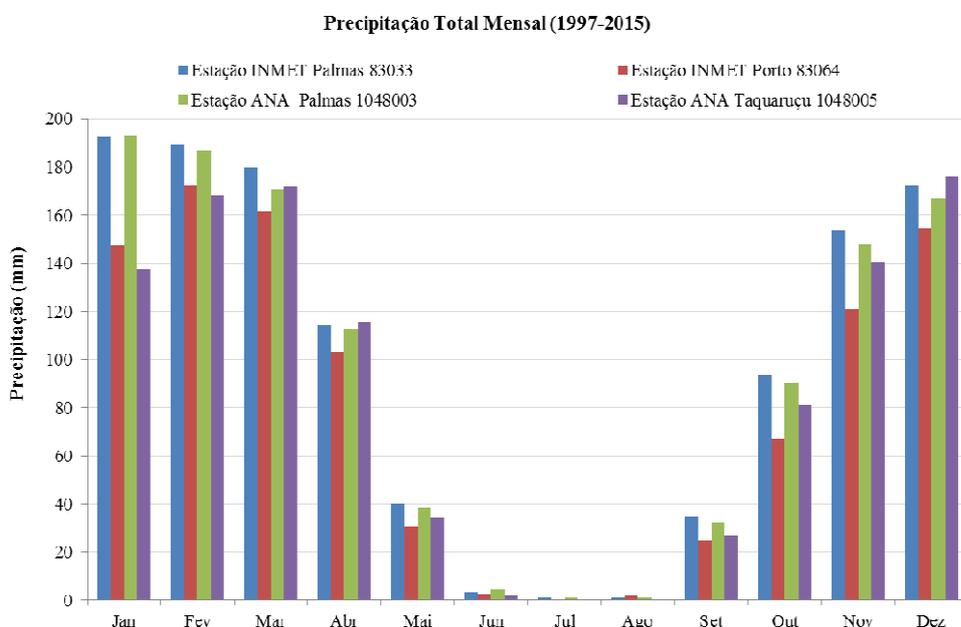


Figura 17 – Precipitação total (médias mensais)

Fonte: INMET (2017) e ANA (2017)

A Figura 17 apresenta a precipitação total por médias mensais no período de 1997 a 2015, enquanto a Figura 18 demonstra a precipitação total anual que permite observar que o maior e menor pico de precipitação foi registrado pela Estação ANA Taquaruçu (2721,1 mm no ano de 2009 e 828,11 mm em 2013, respectivamente).

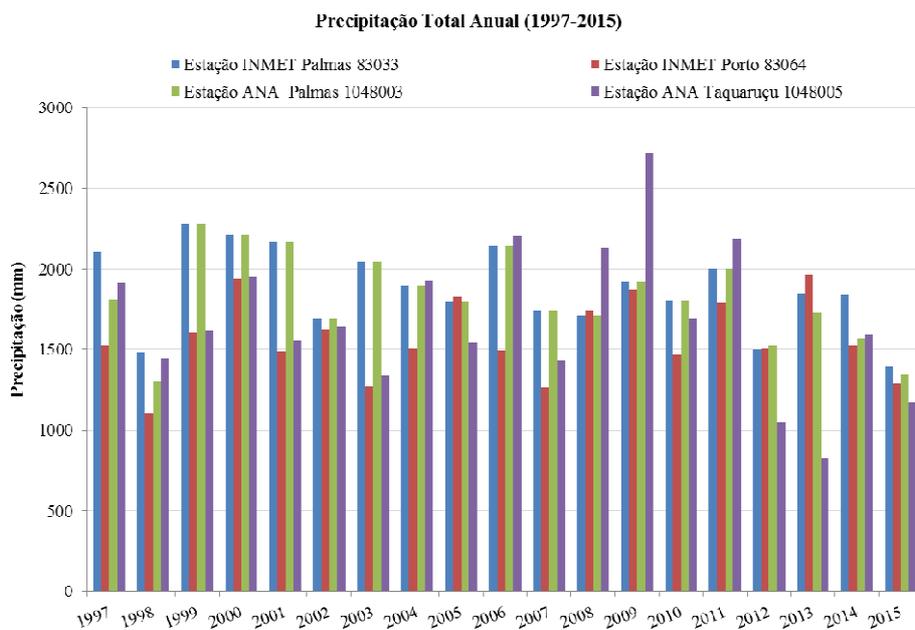


Figura 18 – Precipitação total anual
Fonte: INMET (2017) e ANA (2017)

A estação Palmas evidencia que a média mensal da temperatura máxima diária é maior nos meses de julho (35,11 °C), agosto (36,68 °C) e setembro (37 °C). Enquanto a média mensal da temperatura mínima observa-se um decréscimo no período de maio a julho, onde atinge seu menor valor (19,78 °C). A estação Porto Nacional possui comportamento similar ao da estação de Palmas onde a média mensal da temperatura máxima diária também é maior nos meses de julho, agosto e setembro (35,47 °C, 37,01 °C e 37,27 °C, respectivamente), conforme Figura 19.

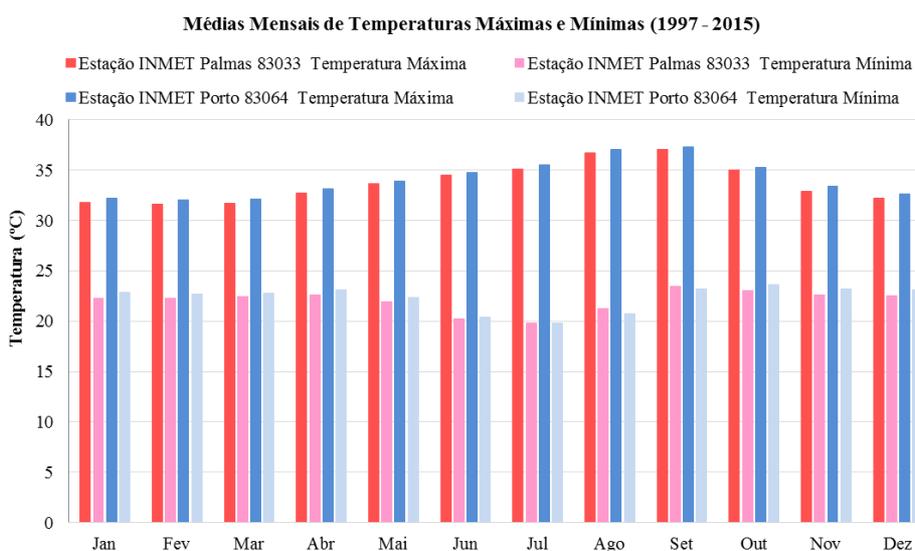


Figura 19 – Médias mensais de temperatura máxima e mínima
Fonte: INMET (2017)

Em ambas as estações meteorológicas, os menores picos de umidade relativa do ar ocorreram de julho a setembro (estação Palmas: 50,45%, 42,36% e 48,32%, respectivamente e estação Porto Nacional: 53,86%, 45,15% e 49,99%, na devida ordem), embora na estação de Porto os valores registrados sejam ligeiramente maiores quando comparados aos valores auferidos pela estação Palmas (Figura 20).

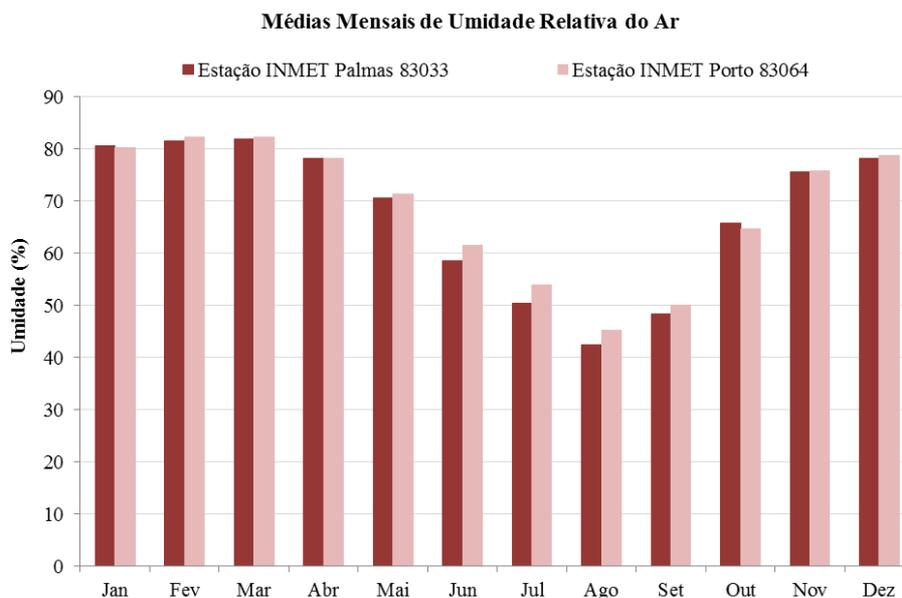


Figura 20 – Médias mensais de umidade relativa do ar
Fonte: INMET (2017)

A Figura 21 demonstra que a estação Palmas registrou maior radiação solar no mês de agosto (21,73 MJ/m².dia) assim como a estação Porto Nacional (21,59 MJ/m².dia).

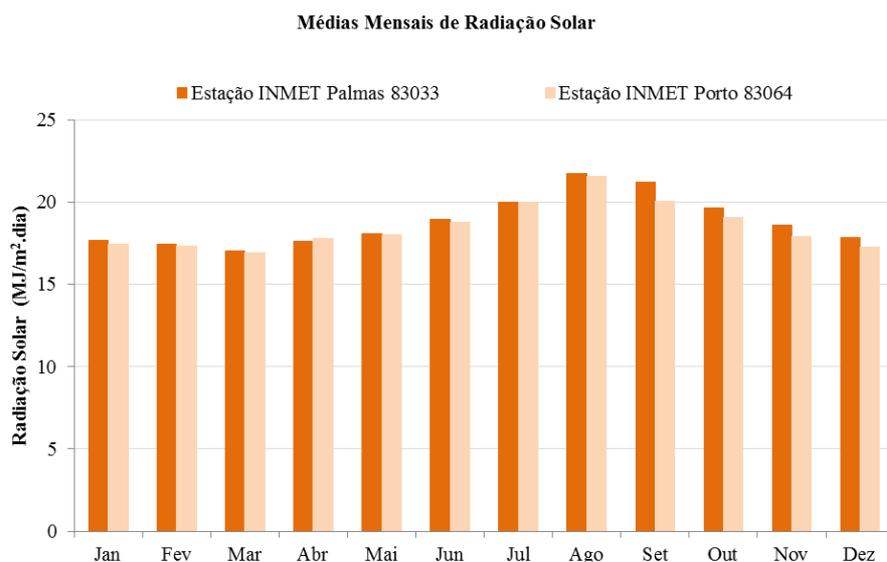


Figura 21 – Médias mensais de radiação solar
Fonte: INMET (2017)

A estação Palmas auferiu maior velocidade do vento em agosto ($2,19 \text{ m s}^{-1}$) enquanto a estação de Porto Nacional registrou o valor de $1,12 \text{ m s}^{-1}$ em setembro (Figura 24). De modo geral, as variáveis apresentaram comportamento similar nas estações meteorológicas utilizadas neste trabalho.

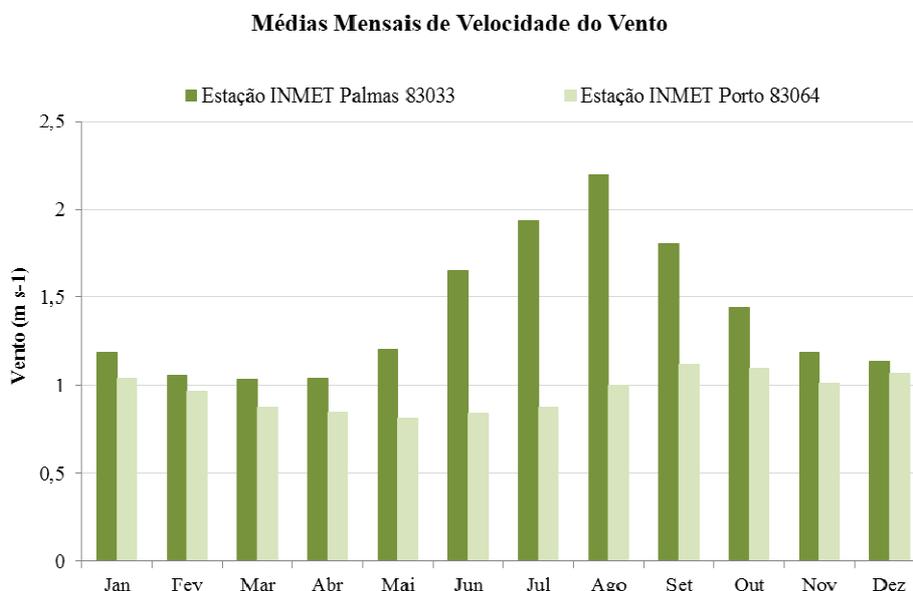


Figura 22 – Médias mensais de velocidade do vento
Fonte: INMET (2017)

5.2 APLICAÇÃO DO SWAT

5.2.1 Delineamento e Discretização da Bacia

Adotou-se como área limiar para definição de sub-bacias e drenagem o valor de 500 hectares, ressalta-se que a área mínima indicada pelo *software* foi de 413 hectares. A Estação de Tratamento de Água (conhecida como ETA 006) foi definida como exutório da bacia devido ao fato da estação ser próxima da confluência dos rios. Dessa forma, foram geradas três sub-bacias (Figura 23) sendo que a sub-bacia 2 foi criada apenas para receber as vazões das demais sub-bacias, representando o exutório da área de estudo. De acordo com Castro (2013) essa medida é fundamental para evitar erros na modelagem já que as respostas de vazão de todas as sub-bacias devem ser vertidas em uma sub-bacia específica.

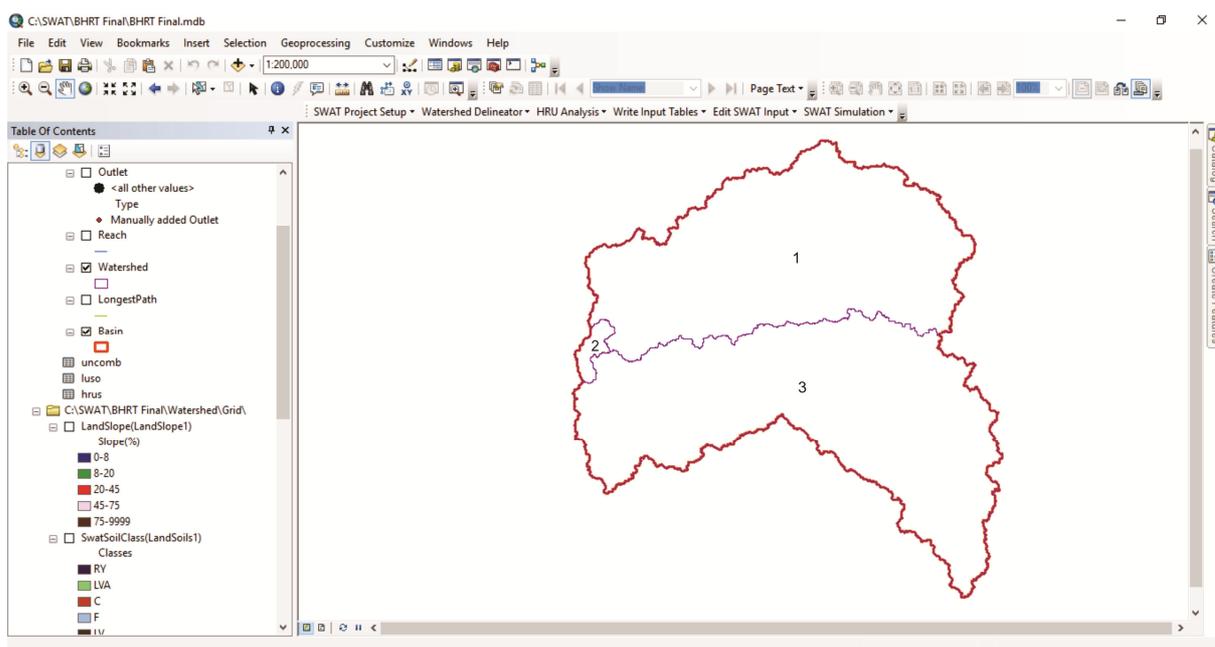


Figura 23 – Sub-bacias do objeto de estudo

Cabe ressaltar que foi desconsiderado da modelagem uma barragem de acumulação de água localizada no interior da sub-bacia 3.

Conforme explanado anteriormente, o modelo SWAT foi executado considerando todas as URHs e sub-bacias gerando 245 Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs), a Tabela 2 apresenta a quantidade de URHs para cada sub-bacia.

Tabela 2 – Sub-bacias geradas e suas respectivas URHs

Sub-bacia	URHs
1	97
2	35
3	113
Total	245

5.3 AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO INICIAL

Preliminarmente à análise de sensibilidade e à calibração propriamente dita, foi efetuada a comparação gráfica e estatística das vazões observadas e simuladas com a utilização de duas funções objetivo (NSE e R^2), nas sub-bacias 1 e 3, no período de 04/2013 a 07/2014.

Destaca-se que não foi objeto deste estudo a sub-bacia 2, pois a mesma foi gerada considerando a localização da ETA 006 como exutório da bacia e não há dados de monitoramento de vazão disponíveis.

A simulação inicial obteve os seguintes valores da função objetivo de *Nash-Sutcliffe* (NSE) -28,47 (sub-bacia 1) e -5,75 (sub-bacia 3) enquanto o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,21 (sub-bacia 1) e 0,24 (sub-bacia 3), conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das funções objetivos na simulação inicial

Função Objetivo	Sub-bacia		Valor Referência*
	1	3	
NSE	-28,47	-5,75	> 0,4
R^2	0,21	0,24	> 0,5

*Valores indicados por Green e Van Griesven (2008).

Segundo Green e Griesven (2008), uma simulação com dados diários é considerada satisfatória quando os valores de NSE são superiores a 0,4 e R^2 superiores a 0,5, portanto o modelo obteve resultado insatisfatório na simulação inicial. Assim, os resultados da simulação inicial indicam que o SWAT não foi capaz de reproduzir satisfatoriamente as vazões já que há uma forte tendência do modelo em superestimar as vazões máximas.

De acordo com os hidrogramas (Figura 24 e Figura 25), percebe-se que os picos de vazão foram superestimados (exemplo: vazão simulada igual a 119,8 $m^3 s^{-1}$ sendo a vazão observada de 1,54 $m^3 s^{-1}$, sub-bacia 3 em 13/12/13). O escoamento de base foi subestimado haja vista que apresentou, em vários períodos, valores iguais à zero enquanto os valores das vazões mínimas observadas eram maiores do que este valor (exemplo: vazão simulada igual a 1,26 $m^3 s^{-1}$ sendo a vazão observada de 0,0 $m^3 s^{-1}$, sub-bacia 1 em 10/09/13).

Este tipo de comportamento foi observado nos estudos de Ferrigo (2011), Salles (2012), Castro (2013), Ferrigo (2014) e Ferreira (2016) que tiveram como objeto de estudo bacias inseridas no bioma cerrado implicando na necessidade de calibração do modelo indicando que esta etapa pode ser considerada parte do processo da modelagem hidrológica.

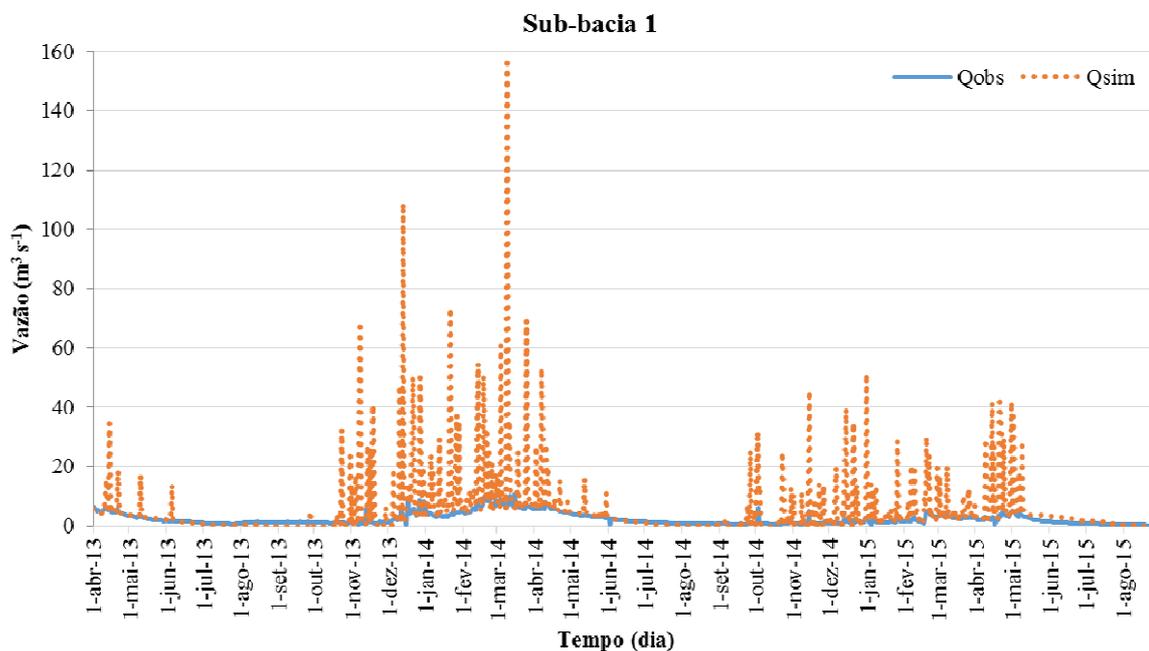


Figura 24 – Vazão simulada e observada sem calibração, sub-bacia 1

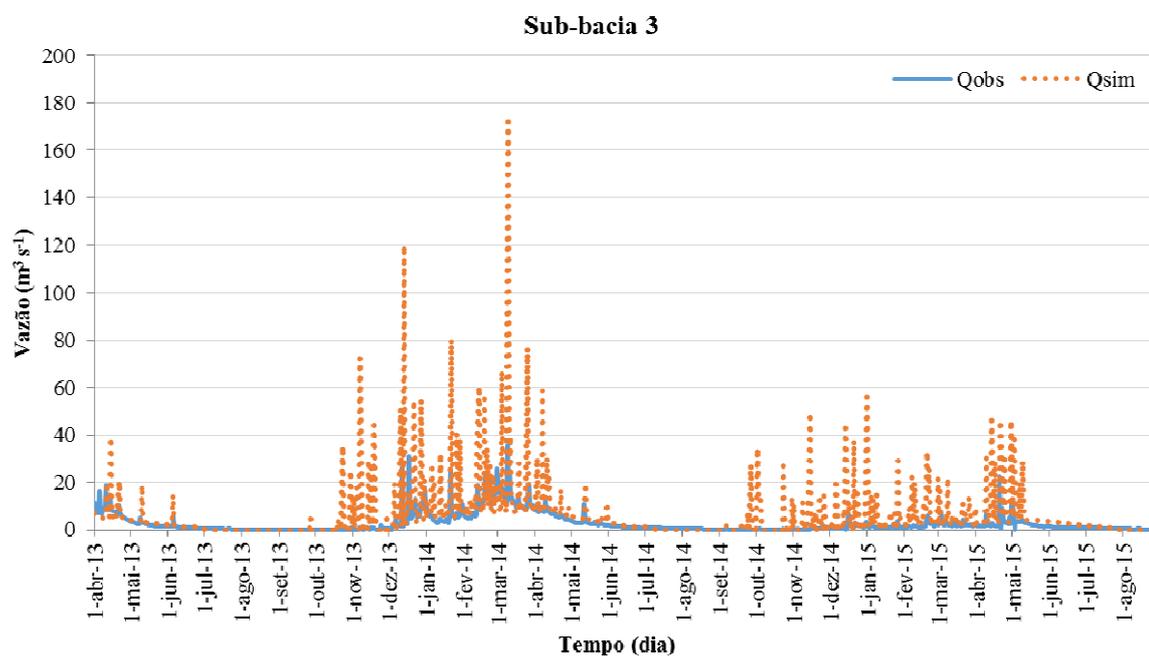


Figura 25 – Vazão simulada e observada sem calibração, sub-bacia 3

A Figura 26 e Figura 27 demonstram a dispersão dos dados estimados em relação aos dados observados indicando que a distribuição dos valores não acontece proporcionalmente e que os dados simulados foram subestimados na modelagem em ambos os casos. Já que isso é

evidenciado pelo distanciamento da linha de tendência e da reta $x=y$ (1:1) ocasionado pela maior dispersão dos pontos abaixo dessa reta nesse intervalo.

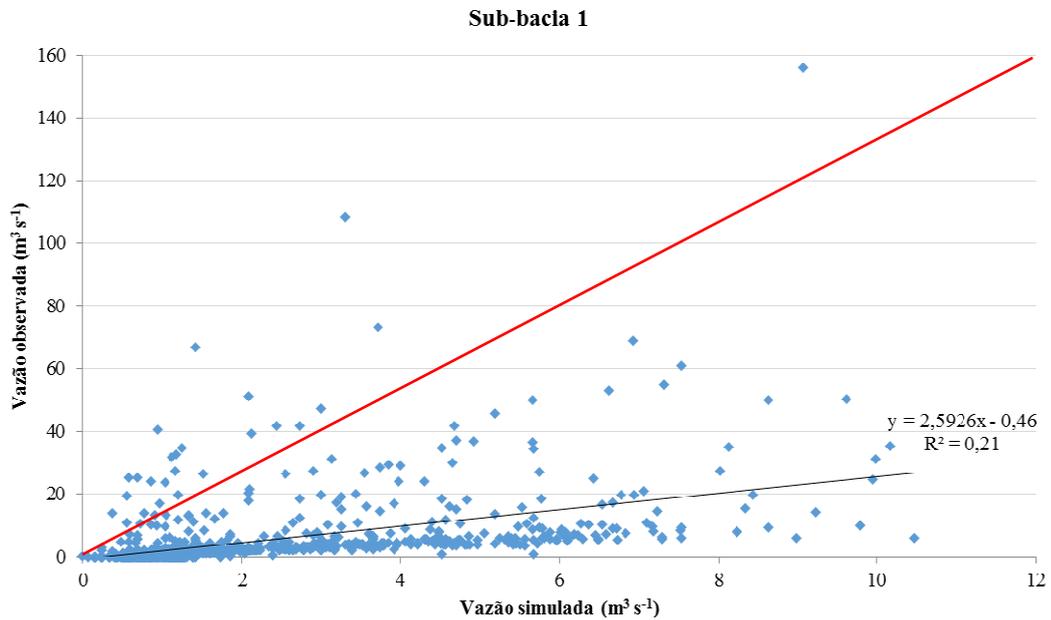


Figura 26 – Diagrama de dispersão da simulação inicial para a sub-bacia 1

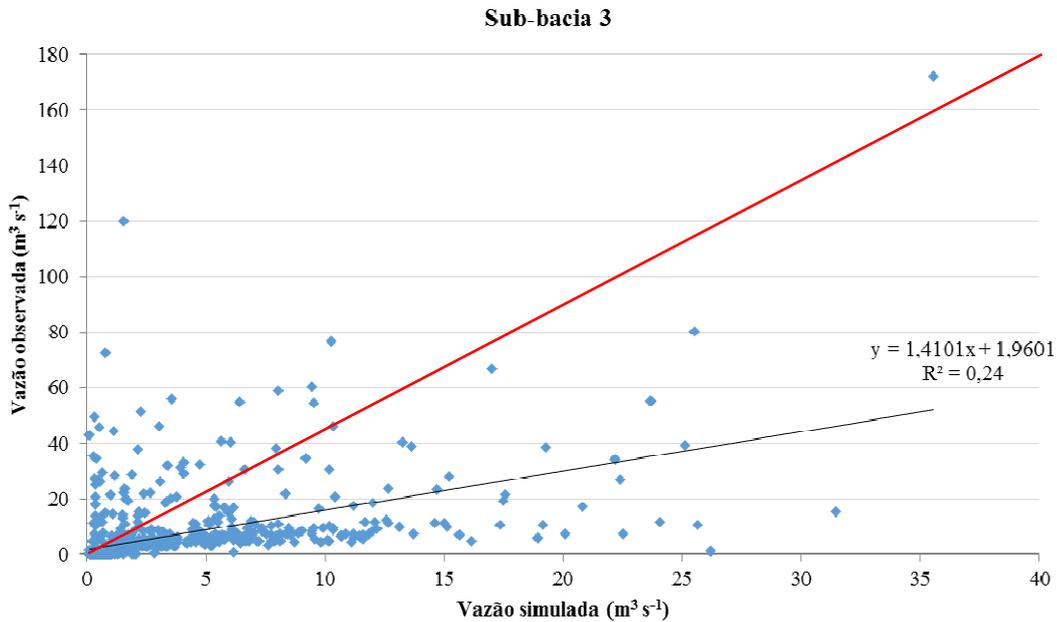


Figura 27 – Diagrama de dispersão da simulação inicial para a sub-bacia 3

5.4 SELEÇÃO DE PARÂMETROS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O SWAT-CUP realiza a análise de sensibilidade concomitantemente à calibração de modo que quanto mais ocorrer variações no valor da função objetivo devido a alterações nos valores do parâmetro, mais sensível é o parâmetro (CARVALHO, 2014). O referido *software* possibilita o cálculo de onze funções objetivo, sendo utilizado neste estudo o NSE.

Com o intuito de racionalizar o processo de calibração foram selecionados para a análise de sensibilidade e calibração os parâmetros que são mais significativos para a simulação de fluxo de água na região do bioma cerrado, conforme os trabalhos de Ferreira (2016), Carvalho (2014) e Ferrigo (2014).

É necessário estabelecer quais serão os limites utilizados para que os parâmetros variem (CASTRO, 2013). Esses limites se referem ao nível de liberdade que se atribui à variação de cada parâmetro e são muito importantes para prevenir distorções nos modelos (CARVALHO, 2014). O Quadro 12 apresenta os parâmetros que são expressivos para a vazão, seus respectivos limites (inferior e superior) e métodos de variação. No presente estudo foram selecionados 14 parâmetros, de modo que a delimitação dos intervalos foi determinada considerando referências de outros trabalhos e conhecimento empírico.

Quadro 12 – Descrição da alteração dos valores dos parâmetros no processo de calibração

Parâmetro	Descrição	Limite inferior	Limite Superior	Método de Variação
ALPHA_BF	Fator alfa do fluxo de base (1/dias)	0	1	Substituição
CN2	Curva número para a condição II (adim)	-0,6	0,2	Multiplicação
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adim)	0	1	Substituição
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	30	450	Substituição
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona não saturada (adim)	0,02	0,2	Substituição
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer (mm)	0	1500	Substituição
REVAPMN	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)	0	500	Substituição
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm/mm)	-0,2	0,6	Multiplicação
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm hr ⁻¹)	-1,5	0,8	Multiplicação
SHALLST	Altura inicial da água no aquífero raso (mm)	500	5000	Substituição
GWHT	Altura inicial da água subterrânea (mm)	0	25	Substituição
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)	-0,93	-0,6	Multiplicação
DEEPST	Altura inicial da água no aquífero profundo (mm)	0	5000	Substituição
ANION_EXCL	Fração de porosidade – espaços vazios (adim)	0,01	1	Substituição

A análise de sensibilidade global foi realizada e seu resultado gráfico é apresentado pela Figura 28. O *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, em que quanto maior for o seu valor mais sensível é o parâmetro e o valor de *p-value* determina a significância da sensibilidade dos parâmetros (quanto mais próximo de zero maior a significância).

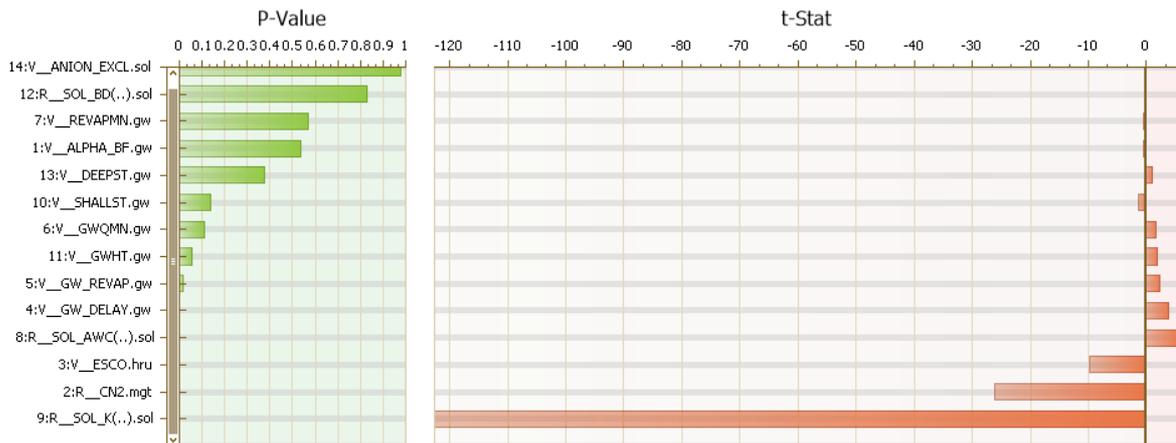


Figura 28 – Resultado da análise de sensibilidade

Na Tabela 4 são apresentados os valores de *t-Stat* e *P-Value* obtidos durante a análise de sensibilidade global da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.

Tabela 4 – Parâmetros e respectivos valores de *t-Stat* e *P-Value*

Parâmetros	<i>t-Stat</i>	<i>P-Value</i>
SOL_K	-122,597	0,0000
CN2	-26,089	0,0000
ESCO	-9,680	0,0000
SOL_AWC	5,505	0,0000
GW_DELAY	3,755	0,0001
GW_REVAP	2,377	0,0176
GWHT	1,919	0,0552
GWQMN	1,596	0,1106
SHALLST	-1,486	0,1375
DEEPST	0,885	0,3761
ALPHA_BF	-0,616	0,5375
REVAPMN	-0,573	0,5663
SOL_BD	-0,214	0,8301
ANION_EXCL	-0,028	0,9774

Ao analisar a Figura 28 e Tabela 4 o gráfico e tabela relativos aos resultados de sensibilidade, observa-se que os parâmetros SOL_K e CN2 tiveram maior influência dentre os parâmetros apresentados, comportamento semelhante foi observado na bacia do Alto Rio Jardim-DF (CARVALHO, 2014). Observa-se também que os parâmetros ESCO e SOL_AWC apresentaram grande influência dentro dos parâmetros selecionados. Por outro lado, o

parâmetro ANION_EXCL foi o que apresentou menor influência dentre os demais parâmetros.

É possível observar o comportamento da relação do valor atribuído ao parâmetro com o efeito na resposta da função objetivo, sendo isso considerado a sensibilidade do modelo ao parâmetro (FERRIGO, 2014). Para isso o SWAT-CUP fornece gráficos de dispersão para cada parâmetro, onde o eixo x é a distribuição do valor do parâmetro atribuído e o eixo y é a respectiva resposta da função objetivo (no caso, *Nash-Sutcliffe*), conforme pode ser visualizado na Figura 29.

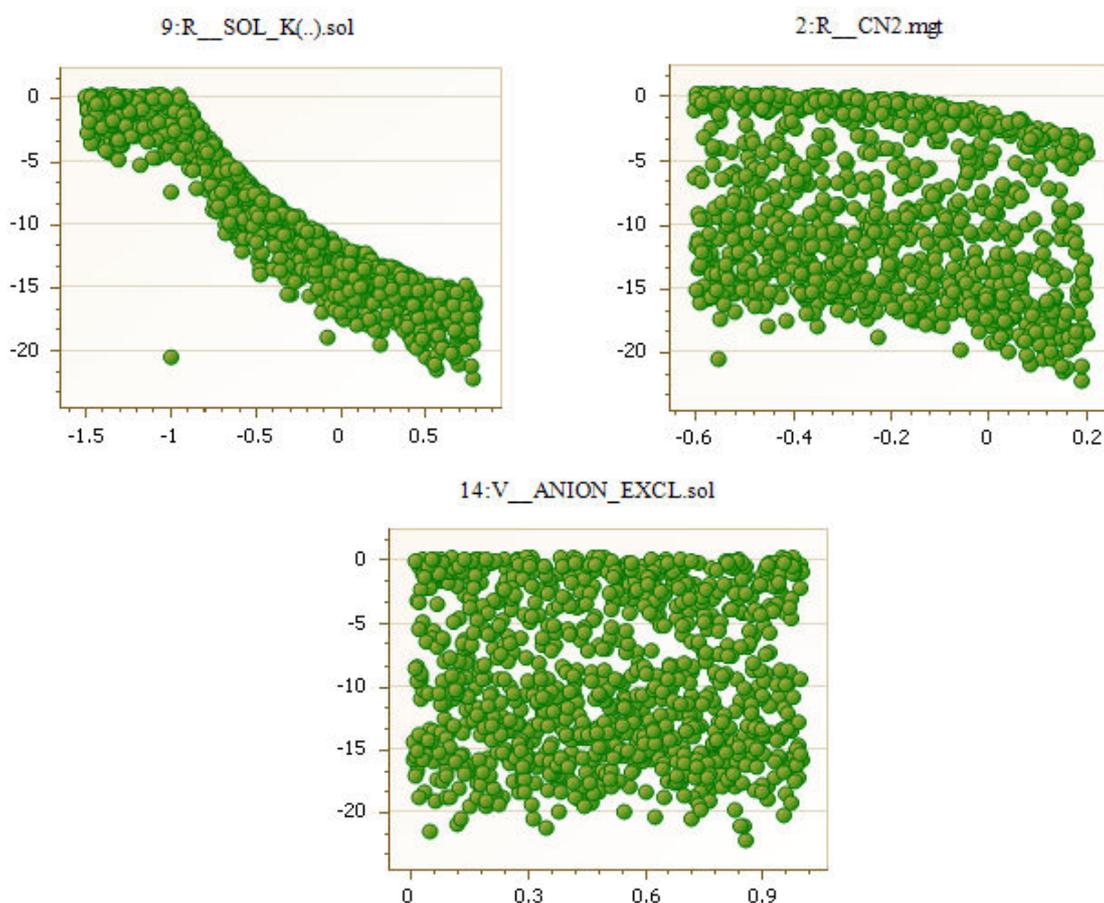


Figura 29 – Gráficos de dispersão, valor do parâmetro versus função objetivo (NSE)

A Figura 29 relativa ao parâmetro SOL_K demonstra que os pontos à esquerda originam em melhores valores da função objetivo sendo que à medida que o valor do parâmetro é aumentado o valor da função objetivo decresce. Enquanto que para o parâmetro ANION_EXCL não é possível verificar uma tendência haja vista que os melhores resultados da função objetivo são encontrados em todo o intervalo de variação.

5.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração automática foi realizada com 1000 simulações, dentro dos intervalos adotados na análise de sensibilidade, em passo diário referente ao período de abril de 2013 a julho de 2014, sendo registrados 487 dados diários de vazão. O Quadro 13 apresenta o valor ajustado para cada um dos parâmetros, bem como o método de variação empregado.

Quadro 13 – Parâmetros, valor e métodos utilizados no processo de calibração

Parâmetro	Unidade	Valor da Melhor Calibração	Método de Variação
ALPHA_BF	1/dias	0,8685	Substituição
CN2	adimensional	-0,542	Multiplicação
ESCO	adimensional	0,4155	Substituição
GW_DELAY	dias	160,409988	Substituição
GW_REVAP	adimensional	0,15293	Substituição
GWQMN	mm	1473,75	Substituição
REVAPMN	mm	290,75	Substituição
SOL_AWC	mm/mm	0,4492	Multiplicação
SOL_K	mm/hr ⁻¹	-1,32865	Multiplicação
SHALLST	mm	1042,25	Substituição
GWHT	mm	6,4125	Substituição
SOL_BD	g/cm ³	-0,628875	Multiplicação
DEEPST	mm	4192,5	Substituição
ANION_EXCL	adimensional	0,468865	Substituição

A calibração da sub-bacia 1 apresentou um NSE de -0,05 e um R² de 0,55 enquanto a sub-bacia 3 demonstrou um NSE e um R² de 0,51. Ao comparar os resultados das funções objetivo da simulação inicial com os valores apresentados após a calibração constata-se um melhor ajuste na representação do modelo em ambas as sub-bacias (Figura 30 e Figura 31).

Após a calibração do modelo, os valores mais altos apresentados pela vazão observada foram de 10,46 m³ s⁻¹ (sub-bacia 1, em 15/03/14) e 35,55 m³ s⁻¹ (sub-bacia 3, em 09/04/14) enquanto o valor estimado pelo modelo foi de 7,82 m³ s⁻¹ e 56,93 m³ s⁻¹, respectivamente. Já os menores valores apresentados pela vazão observada foi 0,0 m³ s⁻¹ (sub-bacia 1, em 06/11/13) e 0,116 m³ s⁻¹ (sub-bacia 3, em 14/10/13) sendo estimado pelo modelo os valores de 1,116 m³ s⁻¹ e 1,65 m³ s⁻¹, na devida ordem. Dessa forma, pode-se dizer que o modelo obteve melhor desempenho na simulação das vazões no período de estiagem.

Foi verificada a diminuição dos valores de pico quando comparados à simulação inicial, embora o modelo não tenha conseguido simular todos os picos de forma exitosa já que houveram picos que foram subestimados e outros que mesmo tendo sido minimizados continuaram apresentando valores maiores do que os observados. A Figura 30 e Figura 31 apresentam os hidrogramas observados e simulados após a calibração automática.

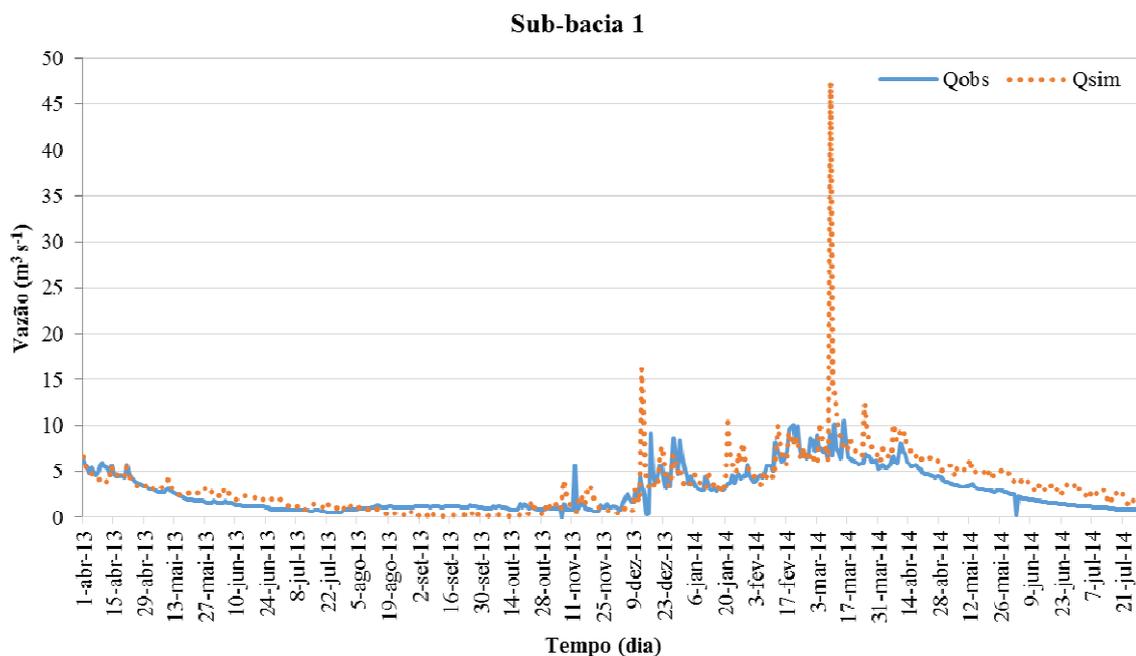


Figura 30 – Vazão simulada e observada após calibração, sub-bacia 1

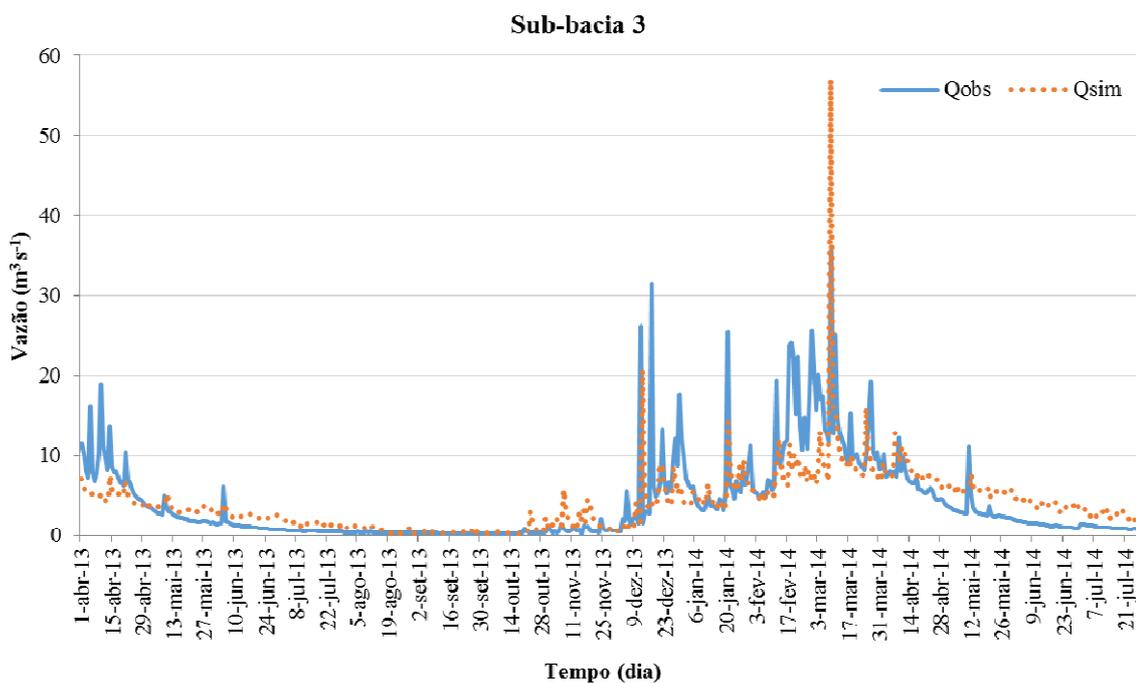


Figura 31 – Vazão simulada e observada após calibração, sub-bacia 3

Ao comparar os resultados da simulação inicial com a Figura 30 e Figura 31 verificou-se melhor ajuste, principalmente na redução dos picos da vazão simulada. Também se constata melhor distribuição dos dados em relação à reta de tendência aproximando de 1 (Figura 32 e Figura 33).

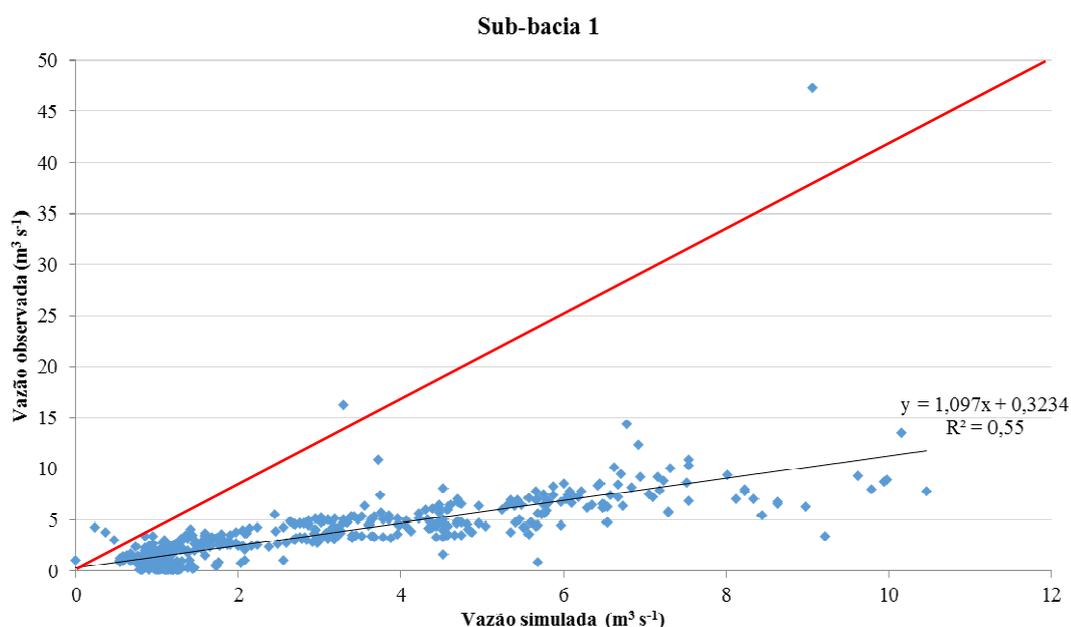


Figura 32 – Diagrama de dispersão após calibração, sub-bacia 1

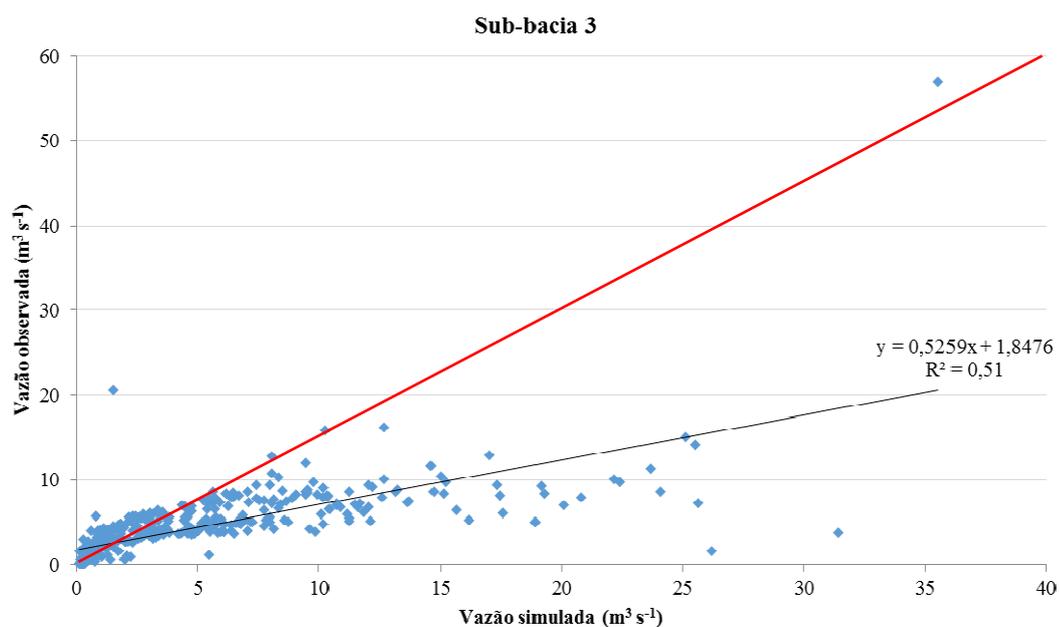


Figura 33 – Diagrama de dispersão após calibração, sub-bacia 3

Considerando os valores de referência recomendados por Green e Van Griesven (2008), os resultados apresentados pelas funções objetivo posterior à calibração demonstraram valores considerados satisfatórios para R^2 e NSE, exceto pelo resultado apresentado pela sub-bacia 1 para a função objetivo NSE (-0,05). Já para Santhi et al. (2001) e Van Liew et al. (2003) valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis.

De acordo com Viola et al. (2012), o NSE está relacionado à eficiência de estimativa de vazões de pico do hidrograma que é uma das fases mais difíceis no processo de simulação

hidrológica. Bellon (2014) afirma que esta função objetivo é uma medida que compara o desempenho em termos da variância das vazões simuladas em relação às observadas, normalizando-as pela variância das vazões médias observadas. Logo, o valor do NSE apresentado pela sub-bacia 1 indica que o desempenho relativo ao ajuste das vazões de pico foi insatisfatório.

5.6 VALIDAÇÃO DO MODELO

Posteriormente a calibração, procedeu-se a validação utilizando o mesmo conjunto de valores dos parâmetros obtidos no período de calibração a fim de verificar a capacidade do *software* em simular de forma adequada a área de estudo. Ressalta-se que o intervalo de dados utilizados compreende o período de agosto de 2014 a agosto de 2015, sendo registrados 396 dados diários de vazão. Conforme pode ser observado na Tabela 5, a validação resultou nos seguintes valores: NSE de 0,44 e R^2 de 0,54 (sub-bacia 1) e 0,24 e 0,29 na sub-bacia 2, respectivamente.

Tabela 5 – Comparação dos resultados das funções objetivos

Função Objetivo	Sub-bacia						Valor Referência*
	Simulação Inicial		Após Calibração		Validação		
	1	3	1	3	1	3	
NSE	-28,47	-5,75	-0,05	0,51	0,44	0,24	> 0,4
R^2	0,21	0,24	0,55	0,51	0,54	0,29	> 0,5

*Valores indicados por Green e Van Griesven (2008).

Considerando os valores de referência indicados por Green e Van Griesven (2008), os resultados no período de validação foram satisfatórios na sub-bacia 1, não ocorrendo o mesmo para a sub-bacia 3.

Ao observar a Tabela 5 verifica-se que a sub-bacia 1 obteve melhores resultados no período de validação do que na fase de calibração que registrou um valor de NSE negativo (-0,05). Já a sub-bacia 3 apresentou melhores resultados para NSE e R^2 no período de calibração e valores menores na etapa de validação, comportamento semelhante foi observado por Garrido (2003) que aplicou o modelo SWAT no estado da Bahia e obteve valores insatisfatórios para a calibração e validação, sendo os resultados desta última etapa menores do que as registradas na calibração.

Bellon (2014) elucida que, graficamente, o NSE representa o ajuste (aderência) das vazões calculadas em relação às observadas enquanto o R^2 indica, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. De acordo com o autor, estas funções objetivo são mais sensíveis às diferenças maiores entre valores simulados e observados o que

pode explicar os valores obtidos pelas funções objetivos na etapa de validação na sub-bacia 3 já que houve menor aproximação entre a vazão simulada e observada, ao se comparar com o período de calibração.

A Figura 34 e a Figura 35 apresentam os hidrogramas que demonstram discrepâncias na simulação dos picos das vazões em ambas as sub-bacias.

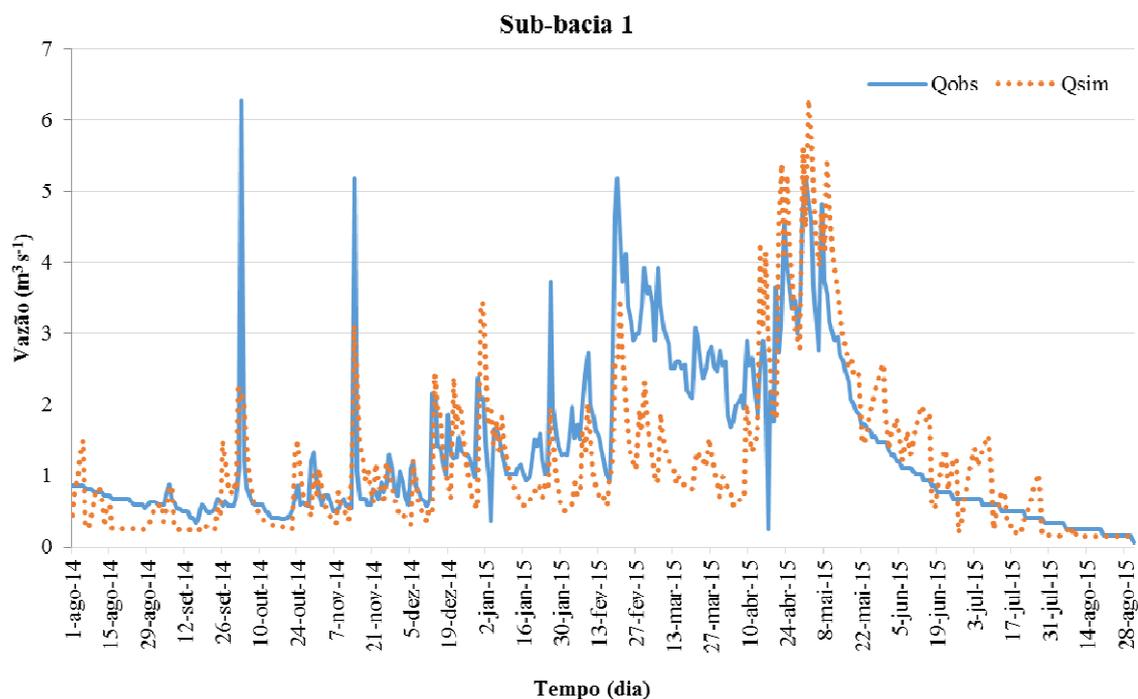


Figura 34 – Vazão simulada e observada no período de validação, sub-bacia 1

De maneira geral, percebe-se que o fluxo de base no período de validação foi subestimado, assim como os picos de vazão. O valor mínimo obtido para a vazão simulada, na sub-bacia 1, foi de $0,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão observada: $0,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em 31/08/15) e o valor máximo da vazão de pico foi de $6,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão observada: $4,91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em 02/05/18). Para a sub-bacia 3 a vazão mínima foi de $0,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão observada: $0,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 31/08/15) e a vazão de pico de $7,60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão observada: $6,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em 02/05/18).

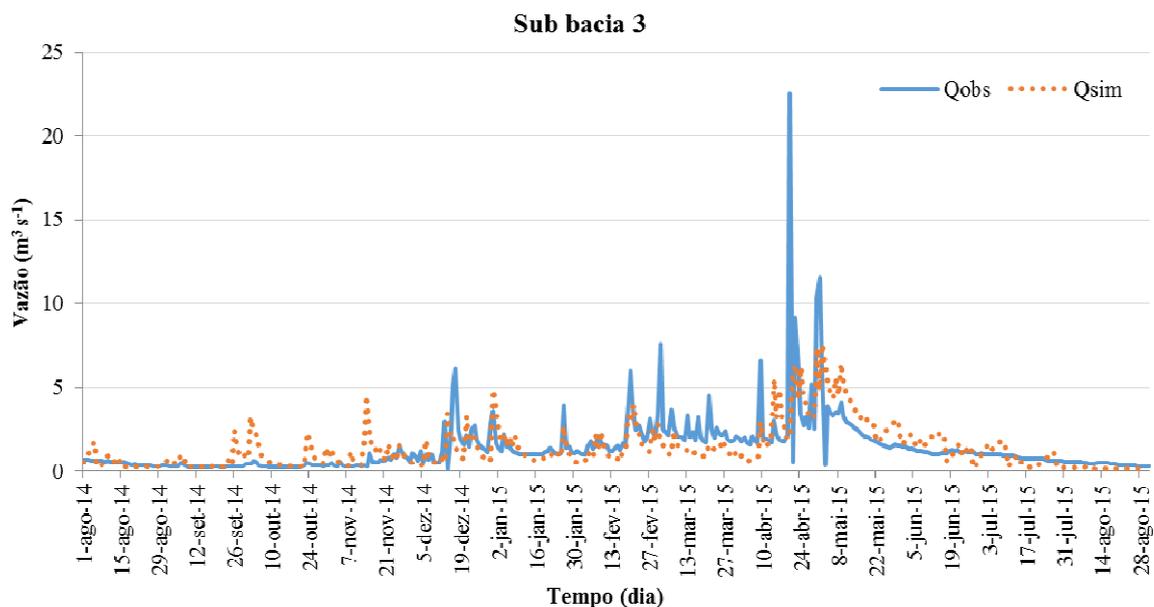


Figura 35 – Vazão simulada e observada no período de validação, sub-bacia 3

A Figura 36 demonstra melhor ajuste com relação ao período de calibração para a sub-bacia 1, bem como um aperfeiçoamento na distribuição dos pontos em relação à reta de tendência. Enquanto que a sub-bacia 3 ocorreu menor ajuste na distribuição dos dados (Figura 37) que conjuntamente com os valores de NSE e R^2 indica um desempenho, no período de validação, insatisfatório.

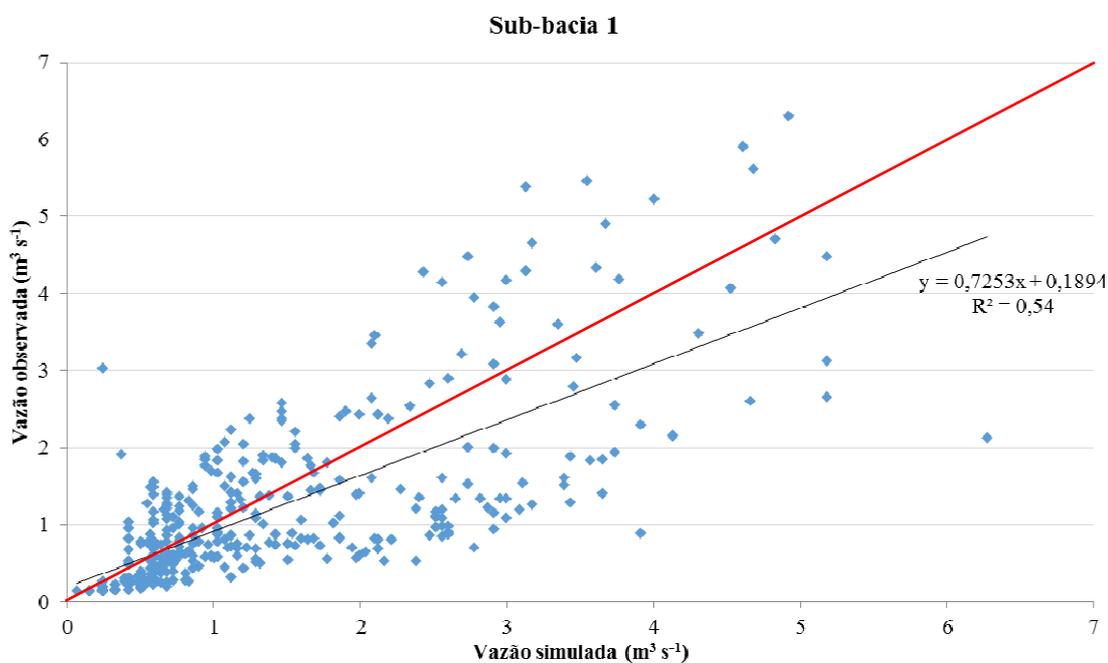


Figura 36 – Diagrama de dispersão no período de validação, sub-bacia 1

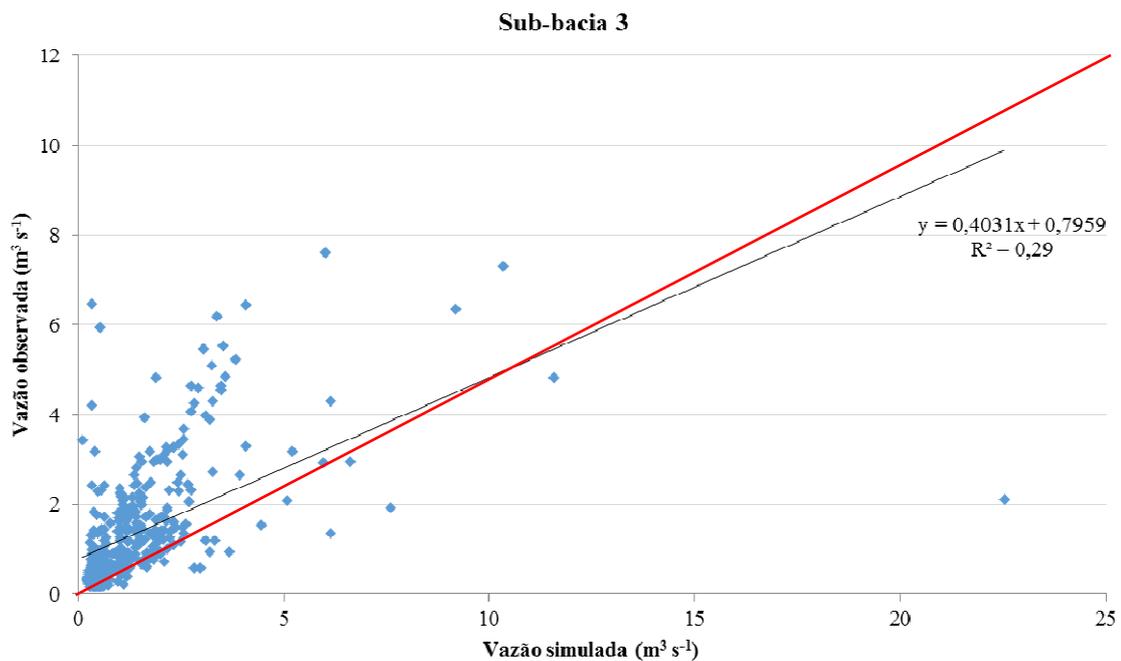


Figura 37 – Diagrama de dispersão no período de validação, sub-bacia 3

Castro (2013) conduziu um trabalho de modelagem em bacia no Distrito Federal com dados de vazão observados referentes a dois anos, utilizando o primeiro ano para calibração e o segundo para validação e obteve um NSE de -0,84 na fase de validação do modelo. Carvalho (2014) deu sequência ao trabalho realizado e adicionou dados de mais um ano na fase de calibração e obteve um NSE de 0,49, deste modo foi observada a relevância de se ter séries maiores uma vez que o emprego de um intervalo muito curto para a calibração pode gerar grande nível de incerteza.

Um dos elementos que influenciam a diferença entre os resultados obtidos no período de calibração e validação é o curto período das séries históricas, principalmente para o período de calibração, de modo que o período utilizado pode não ser significativo para representar as condições hidrológicas da bacia, primordialmente em relação ao ano de validação do modelo (CASTRO, 2013). Deste modo, considera-se que a inversão dos resultados apresentados pelas sub-bacias nas etapas de calibração e validação (Tabela 5) pode ser devido a curta série histórica utilizada para a modelagem (total de 2 anos e 4 meses de dados de vazão, 883 registros diários) o que pode ter sido insuficiente para a representação do regime hidrológico.

Apesar dos autores do *software* afirmarem que o modelo pode ser utilizado em bacias sem monitoramento (NEITSCH et al., 2011), Garrido (2003) salienta que esta afirmação é apropriada para a realidade americana diferentemente da realidade brasileira já que as

informações estão em diversas fontes (quando disponíveis) e em nível de detalhe menor do que o exigido pelo modelo. Assim, o uso de dados de referência é uma alternativa para a aplicação do modelo, ao passo que essas incertezas são atribuídas as saídas do modelo (CASTRO, 2013).

A habilidade do SWAT em simular as vazões hidrográficas está fortemente relacionada com a presença e qualidade dos dados de precipitação informados (SANTOS, 2010). Para realizar a espacialização da chuva o programa adota o posto mais próximo ao centróide da bacia, Garrido (2003) ressalta que esta medida pode originar bons resultados quando a bacia é de pequeno porte e possui pouca variação climática e tem uma boa densidade de rede climatológica. Logo, considera-se que a utilização de duas estações meteorológicas localizadas fora dos limites da área de estudo pode ter gerado erros nos cálculos de evapotranspiração devido a possível ineficiência em reproduzir as variações climáticas presentes na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.

As parametrizações realizadas para aplicação do modelo e a escassa rede meteorológica e pluviométrica podem ter afetado o resultado final em virtude da quantidade de dados estimados.

Diante do exposto, considerando que o objeto de estudo é responsável pela maior parte do abastecimento público do município de Palmas – TO e que o *software* não conseguiu simular de forma adequada as vazões mínimas conclui-se que os resultados gerados pelo programa são insatisfatórios tendo em vista que a simulação das vazões mínimas é importante para auxiliar nas tomadas de decisão relacionadas a planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu.

6 CONCLUSÕES

O SWAT não conseguiu simular de forma adequada a vazão da bacia sendo necessária a calibração do modelo. A fim de corrigir a tendência em superestimar a vazão nos períodos chuvosos e subestimá-la na época de estiagem.

A análise de sensibilidade possibilitou a identificação dos parâmetros mais significativos para a simulação da vazão na área da bacia estudada, sendo eles: SOL_K e CN2. À medida que o parâmetro ANION_EXCL foi o menos influente.

Após a realização da calibração, o modelo apresentou valor de NSE de -0,05 e um R² de 0,55 para a sub-bacia 1 e valor de 0,51 na sub-bacia 3 para ambas as funções objetivos. Por outro lado, o período de validação demonstrou um NSE de 0,44 e R² de 0,54 para a sub-bacia 1 e 0,24 e 0,29 para sub-bacia 3, respectivamente. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu torna-se importante para a região tendo em vista que é responsável pela maior parte do abastecimento público do município de Palmas – TO, entretanto o programa não conseguiu simular de forma adequada as vazões mínimas e, por isso, conclui-se que os resultados gerados pelo *software* foram insatisfatórios.

Tendo em vista a existência de apenas uma estação pluviométrica no interior da bacia e a inexistência de estação meteorológica, recomenda-se o adensamento destas redes de monitoramento a fim de se obter maior conhecimento sobre a intensidade e a distribuição das chuvas, bem como obter mais dados a respeito da variação climática do local. Sugere-se o prosseguimento do monitoramento da vazão e da pluviometria.

As sugestões elencadas acima visam obter dados hidrológicos e meteorológicos do local com o intuito de propiciar a aplicação de modelos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu, bem como obter melhores resultados na modelagem.

Admite-se que o cenário ideal para aplicação deste *software* é a construção de uma base de dados específica para a área de estudo, por isso recomenda-se a execução desta etapa para trabalhos futuros contemplando a coleta dos dados físico-químicos relativos ao solo.

Como sugestão para futuros trabalhos, é indicado realizar levantamento e/ou produção de dados mais detalhados (principalmente de pluviometria e dos dados físico-químicos de solo) com a finalidade de melhorar a resposta do modelo SWAT. Além da inserção do reservatório existente, inclusão das práticas de irrigação e de culturas, a implementação da análise de incerteza, além de efetuar maior discretização de sub-bacias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf. Switzerland: 2015, 100 p. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p. Irrigation and Drainage, Paper 56. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

ANA - Agência Nacional das Águas. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Caderno de recursos hídricos, 2005. ANA-CDOC. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

_____. **HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

_____. Portaria nº 149, de 26 de março de 2015. **Lista de termos para o Thesaurus de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149.2015.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2016.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development**. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 1-17, 1998. Disponível em: <<http://ssl.tamu.edu/media/11951/large%20area%20hydrologic%20modeling%20and%20assessment%20part%201.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin**. Journal of Hydrology, v. 227, p. 21-40, 2000. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499001390>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

ARNOLD, J. G.; NEITSCH, S. L.; KINITY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B. **Input/Output Documentation Version 2012**. Texas Water Resources Institute. p. 650, 2012a. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. **SWAT: Model Use, Calibration, and Validation**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Transactions of the ASABE, v. 55(4), p.

1491-1508, 2012b. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/99051/azdezasp.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

_____. **GEO Brasil: recursos hídricos: resumo executivo**. ANA/MMA. Brasília, 2007. 60 p. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2007/GEOBrasilRecursosHidricos.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Lages, 2015. 130 p. Disponível em: <http://www.cav.udesc.br/arquivos/id_submenu/663/dissertacao_thiago_versao_corrigida_pos_banca.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2017.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Dissertação de Mestrado em Física e Meio Ambiente – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005. 132 p. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/14630480-Aplicabilidade-do-modelo-de-simulacao-hidrologica-swat-soil-and-water-assessment-tool-para-a-bacia-hidrografica-do-rio-cuiaba-mt.html>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

BARROS, E. K. K. **Mapeamento de Áreas de Preservação Permanente (APP) e identificação do conflito de uso da terra na bacia do Ribeirão Taquarussu Grande, Palmas – TO**. Monografia de Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2007. 69 p.

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

BELLON, E. **Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. 110 p. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2014/Peamb2014ErnaniBellon_Final_04_06_2014.pdf>. Acesso em: 26 maio 2016.

BONATTO, G. **Usos da terra e produção de sedimentos nas microbacias do Ribeirão Taquaruçu Grande, contribuinte do reservatório da UHE Lajeado, Tocantins**. Dissertação de Mestrado em Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 80 p.

BRASIL. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**.

_____. Secretaria Geral. Projeto Radambrasil. Folha SC. 22. **Tocantins: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, 1981. v. 22, 520 p.

_____. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil.** Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

_____. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.**

_____. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências.**

BESSA, N. G. F.; LUI, J. J.; OLIVEIRA, S. de. **Conservação da biodiversidade e usos múltiplos das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins: uma análise crítica.** Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 5, n. 2, 2011, p. 59-76. Disponível em: <<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/262/253>>. Acesso em: 07 jun. 2016.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. **Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects.** *International Journal of Agricultural and Biological Engineering.* Beijing, v. 8, n. 3, 2015. Disponível em: <<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765/pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

BRITO, C. de F. P. **Avaliação da produção de sedimentos em duas microbacias hidrográficas do Ribeirão Taquaruçu Grande, município de Palmas, TO, Brasil.** Dissertação de Mestrado em Ciências do Ambiente – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2012. 128 p.

BRITO, E. **Estimativa da produção de sedimentos da Bacia do Rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015. 97 p. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_8873_emiliabrito.diss.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2016.

BUENO, E. O.; OLIVEIRA, V. A.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. **Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica.** Revista Scientia Agraria, Curitiba, v. 18, n. 2, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/50371/32866>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

CARDOSO, C. O.; ULLMAN, M. N.; BERTOL, I. **Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC)**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v22n1/18.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2017.

CASTRO, K. B. de. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação de Mestrado em Geociências – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2013, 122 p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13863/1/2013_KassiaBatistaCastro.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2016.

CARVALHO, F. H. de. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2014. 152 p. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/17371>>. Acesso em: 31 jul. 2016.

CHAGAS, R. M.; SCHARDONG, A.; ARAÚJO, C. E. da S.; FONTES, M. P.; SOBRAL, F. M.; MELO NETO, J. de O.; PINTO, D. S. da S.; GARCIA, A. J. V.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Modelagem hidrológica da sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga utilizando o modelo SMAP**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande: ABRH, 2009. 1 CD-ROM. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/540b57922f18d35f8f0307925e3286bf_168d3e2b71457ef347d73825f777d5d9.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2017.

CHAPLOT, V.; SALEH, A.; JAYNES, D. B.; ARNOLD, J. G. **Predicting water, sediment and NO₃-N loads under scenarios of land-use and management practices in a flat watershed**. Water, Air and Soil Pollution. Dordrecht, v. 154, n 1/4, 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AWATE.0000022973.60928.30>>. Acesso em: 30 mai. 2016.

CHIESA, V. B. **Aplicabilidade de modelos matemáticos na análise de processos de outorga: o caso da bacia do ribeirão Taquaruçu**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016. 173 p. Disponível em <<http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/253>>. Acesso em: 17 de ago de 2016.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1981. 188 p.

_____. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1999. 236 p.

CHOW V. T.; MAIDMENT D. R.; MAYS L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1988. Disponível em <https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2018.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** Resolução nº 001/86. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

COSTA, C. A. M. **Aplicabilidade de modelos matemáticos para elaboração de cenários de enquadramentos de corpos hídricos: o caso da Bacia do Ribeirão Taquaruçu, Palmas - TO.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016. 150 p. Disponível em <<http://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/251>>. Acesso em: 15 set. 2016

DOOGE, J. C. I. **The hydrologic cycle as a closed system.** International Association of Scientific Hydrology Bulletin, v.13, p.58-68, 1968. Disponível em <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626666809493568>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa-SPI, 2006.

ESA – European Space Agency. **What is Sentinel-2?**, 2017. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT.** Tese de Doutorado em Geografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. 185 p. Disponível em: <http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/13922/JOSIMAR_GURGEL_FERNANDES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 jun. 2016.

FERREIRA, R. S. **Análise da produção de carga líquida e sólida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT.** Dissertação de Mestrado em Geografia – Universidade de Brasília, Brasília, 2016. 126 p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20891/1/2016_RainaSantosFerreira.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2017.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – estudo de caso da Bacia do Lago Descoberto – DF.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. 164 p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15629/1/2014_SaraFerrigo.pdf>. Acesso em: 15 jun 2016.

_____. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal.** Trabalho de Conclusão do Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 90 p. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/121462/294732.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 jan. 2017.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012. 98 p. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_5809_.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2016.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. **The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010**. In: 2011 International SWAT Conference. Toledo, Spain, 2011. Disponível em: <http://intranetdoc.epagri.sc.gov.br/producao_tecnico_cientifica/DOC_3761.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2016.

GARRIDO, J. M. **Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à bacia do rio Jiquiriçá – Bahia**. Dissertação de Mestrado do Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2003. 198 p. Disponível em: <<http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/04/Juliana-Menezes-2003.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. **The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions**. Transactions of the ASABE, v. 50(4), p. 1211- 1250, 2007. Disponível em: <http://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/asabe_swat.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2017.

GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. V. **Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds**. Environmental Modelling and Software, v. 23, p. 422-434, 2008. Disponível em: <<https://naldc.nal.usda.gov/download/36028/PDF>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. **Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils**. The Journal of Agricultural Science, v. 4(1), p. 1-24, 1911.

HYDE, K.; WOODS, S.; POTTYONDY, J. **Challenges to Watershed Modelling in Forested Mountainous Environments. In: Adaptive Management of Water Resources AWRA Summer Specialty Conference**. Missoula, Montana, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/258327618_Challenges_to_watershed_modeling_in_forested_mountainous_environments>. Acesso em: 07 jul. 2016.

JHA, M. K. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT. Center for Agricultural and Rural Development (CARD)**. Ames, Iowa State University, 2009. Disponível em: <http://lib.dr.iastate.edu/card_workingpapers/530/>. Acesso em: 26 ago. 2016.

KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. J. **Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas.** In: Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Eng. Florestal – UFPR, 1999. p. 111-118. (Apostila do curso). Disponível em <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/monitoramento.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D. C. de; ROCHA, E. de O. **Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v36n2/a31v36n2.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2016.

LIERSCH, S. **The Program pcpSTAT: user's manual.** Berlin, 2003. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/83150/manual_pcpSTAT.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2016.

LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no cerrado.** Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2010. 312 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Enoch_Lima/publication/277147472_Modelagem_numerica_do_fluxo_da_agua_no_solo_e_do_escoamento_de_base_em_uma_bacia_experimental_em_area_agricola_no_Cerrado/links/55a5179108ae81aec913367d.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2017.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; STRAUCH, M.; LORZ, C. **Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do Bioma Cerrado.** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, v. 1. p. 1-8, 2013. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/689a9ee93417c2aea7c60871794c65fc_70db76e7713fe8dfa3f8d4c0fea75ccb.pdf>. Acesso em: 26 mai 2016.

LOPES, N. H. Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/91899/262348.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002. 154 p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-10072002-161200/en.php>>. Acesso em: 30 maio 2016.

MAGALHÃES FILHO, L. N. L.; RODRIGUES, W.; MAGALHAES, K. A. B.; OLIVEIRA, K. B. M. **Valoração de danos ambientais em corpos hídricos: o caso do assoreamento do Ribeirão Taquaruçu Grande no município de Palmas – TO.** Revista de Ciências

Ambientais, v. 6, p. 73-86, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/428/298>>. Acesso em: 02 jun. 2016.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. DA S.; ZUKOWSKI JUNIOR, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L. **Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. Revista de ciências ambientais.** Revista de Ciências Ambientais, v. 6, p. 35-47, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/viewFile/268/761>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

MALUTTA, S. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho – SC com o modelo SWAT.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2012, 127 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/96212/302405.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

MARQUES, A. K. **Avaliação da qualidade de água da sub-bacia do Ribeirão Taquaruçu Grande e da área de sua influência no reservatório da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães, TO.** Tese de Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Anelise%20Kappes%20Marques_D.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.

MELO NETO, J. de O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT.** Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013. 149 p. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/803/1/DISSERTACAO_An%C3%A1lise%20de%20sensibilidade%20escalar%20do%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20SWAT....pdf>. Acesso em: 21 jun. 2016.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Ciclo hidrológico.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** Transactions of the ASABE, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

NRCS – Natural Resources Conservation Service. **National Engineering Handbook.** U.S. Department of Agriculture, Part 630 Hydrology, Chapt. 7, Hydrologic Soil Groups, 2007. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17757.wba>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation: version 2009**. Temple: Blackland Research Center, 2011. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>>. Acesso em 06 jun. de 2016.

NOGUEIRA, P. C. P.; BLAINSKI, É.; ARAUJO, I. S.; GARBOSSA, L. H. P. **Gestão de bacia com múltiplos usos através do uso da modelagem hidrológica de qualidade de água**. In: Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa, 12, 2015, Brasília. Anais. Portugal: APRH, 2015. p. 1-10. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285371725_GESTAO_DE_BACIA_COM_MULTIPLOS_USOS_ATRAVES_DO_USO_DA_MODELAGEM_HIDROLOGICA_DE_QUALIDADE_DE_AGUA>. Acesso em: 26 mai. 2016.

OLIVEIRA, W. N. de. **Avaliação da qualidade ambiental da paisagem da bacia hidrográfica e do reservatório do Ribeirão João Leite**. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. 179 p. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/2923/5/Disserta%20a7%20JoaoLeite_Wellington.pdf>. Acesso em: 15 jun 2016.

PALMAS. Decreto Municipal nº 700 de 15 de janeiro de 2014. **Institui o Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB do Município de Palmas e adota outras providências**. Anexo III – Volume III: Drenagem Urbana, 2014a. Disponível em: <http://www.palmas.to.gov.br/media/doc/arquivoservico/PMSB_Palmas_Volume_03_Drenagem_Urbana_Versao_Final_1.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.

PEREIRA, D. dos R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. 126 p. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1010743/1/TeseDonizetedosReisPerreira.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2016.

PIRES, É. G. **Caracterização ambiental de uma micro-bacia localizada em área de cerrado – solos e hidrologia**. Dissertação de Mestrado em Ciência do Ambiente – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2009. 125 p.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. 225 p. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/3150?mode=full>>. Acesso em: 16 de maio 2016.

PONTES, S. H. N.; FERNANDES, I. V. **Atualização do método das isozonas para a região amazônica**. In: Anais do VII Encontro de Iniciação Científica e Pós-graduação do ITA. São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/viiiencita/Atualizacao%20do%20metodo%20das%20iozonas%20para%20regiao%20amazonica.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. **Gestão de bacias hidrográficas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a04.pdf>>. Acesso em: 03 jul. 2016.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos Para Gestão Ambiental**. Relatório Técnico Parcial, INPE, Dezembro 2000. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2016.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, v.1, 1998. 840 p.

RODRIGUES, D. F.; REIS, R. S. **Aplicação do modelo SWAT na estimativa da produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Coruripe/AL**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, Brasil: ABRH; 2007. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/1197556bb2f7217007150499766d332f_5501444382ea8469e9f14a3729080f31.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2016.

SALLES, L. de A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na Bacia do Ribeirão Pipuripau**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais – Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 114 p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2016.

SANTANA, D. P. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63 p. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/docume30ID-TUSBRYuXa7.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. **Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources**. Journal of the American Water Resources Association. v. 37, n. 5, 2001. Disponível em: <<http://ssl.tamu.edu/media/11881/validation%20of%20the%20swat%20model%20on%20a%20large%20river%20basin%20with%20point%20and%20nps.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

SANTOS, L. F. dos. **Cartografia Geotécnica Regional do Município de Palmas/TO: área a oeste do meridiano 48° W Gr**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Universidade de Brasília, Brasília, 2000. 176 p.

SANTOS, L. L. dos. **Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações**. Revista Brasileira De Geografia Física. Recife, v. 2, n. 03, p. 01-19, set-dez, 2009. Disponível em <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewFile/50/58>>. Acesso em: 04 jul. 2016.

SANTOS, R. F. dos. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SANTOS, R. de O. **Avaliação da produção de sedimento na bacia hidrográfica do rio Potengi através do modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. 186 p. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15968/1/RodrigoOS_DISSERT.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2016.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000321398>>. Acesso em: 02 mar. 2017.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Agência Nacional da Água. Brasília, 2001. 225 p. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/introducao_gerenciamento.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2016.

SILVA, A. M. e. **Gestão de conflitos pelo uso da água em bacias hidrográficas urbanas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará, Belém, 2003. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/ppgec/data/producaocientifica/andressamacedo.pdf>>. Acesso em: 15 ago 2016.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2004. 138 p.

SILVA NETO, A. R. da. **Cenários de abastecimento futuro de Palmas com base na simulação da disponibilidade hídrica do Ribeirão Taquaruçu Grande**. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/35351/000793371.pdf?sequence=1>> Acesso em: 06 jun. 2016.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. **Mathematical modeling of watershed hydrology**. Journal of hydrological engineering, v.7, n.4, p. 270-292. 2002. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%291084-0699%282002%297%3A4%28270%29>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

SCS – Soil Conservation Service. **Hydrology**. Supplement A, Section 4, Chapter 10. National engineering handbook, USDA, Washington, D.C., 1972.

SOUZA, M. A. V. de. **Dinâmica da paisagem na sub-bacia do Ribeirão Taquaruçu Grande no município de Palmas – TO.** Dissertação de Mestrado em Ciências do Ambiente – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2006.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. **Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation.** Journal of Hydrology, v. 414-415, p. 413-424. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229078668_Using_Precipitation_Data_Ensemble_for_Uncertainty_Analysis_in_SWAT_Streamflow_Simulation>. Acesso em: 07 ago. 2016.

TESCH, F. **Avaliação da calibração do modelo *Soil And Water Assessment Tool* para a simulação de estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_8872_Disserta%E7%E3o%20de%20Mestrado%20-%20Fillipe%20Tesch.pdf>. Acesso em: 02 mai jun 2016.

TNC – The Nature Conservancy. **Diagnóstico socioambiental da bacia do ribeirão Taquaruçu.** Relatório 1ª fase. 2012.

TOCANTINS. **Atlas do Tocantins: Subsídios ao planejamento da Gestão Territorial.** Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. Palmas: Seplan, 2012. Disponível em <http://web.seplan.to.gov.br/Arquivos/download/ZEE/TO_AtlasTocantins2012/Atlas_do_Tocantins_2012.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2016.

_____. **Base de dados Geográficos do Mapeamento das Regiões Fitoecológicas e Inventário Florestal do Estado do Tocantins.** Secretaria de Planejamento e Orçamento do estado do Tocantins. Palmas: Seplan, dez.2013. Versão 1. Disponível em: <<https://seplan.to.gov.br/zonamento/publicacoes-tecnicas/tocantins/mapeamento-das-regioes-fitoecologicas-e-inventario-florestal-do-tocantins/>>. Acesso em: 22 fev. 2017

_____. **Carta MI-1644. 2017.** Secretaria de Planejamento e Orçamento do estado do Tocantins. Seplan, 2017. Disponível em: <<http://seplan.to.gov.br/zonamento/bases-vegetoriais/base-cartografica-digital-continua-do-tocantins/folhas-100-mil/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

_____. **Landsat 5 – 2007.** Secretaria de Planejamento e Orçamento do estado do Tocantins. Palmas: Seplan, 2007. Mosaico: MI-1644. Disponível em: <<http://seplan.to.gov.br/zonamento/imagens-de-satelite/landsat-5-2007-mosaico/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

_____. **Plano das bacias hidrográficas do entorno de Palmas – TO.** Secretaria do Meio Ambiente e Planejamento do Tocantins. Palmas: Seplan-DMA, 2004. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/269437/>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

_____. **Plano da Bacia Hidrográfica do Lago de Palmas. Fase A – Diagnóstico da Bacia Hidrográfica.** Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Tocantins – Semarh. Palmas, 2015. Disponível em <<http://cbhlagodepalmas.org.br/downloads/category/3-plano-do-lago>>. Acesso em 04 de abr. de 2017.

_____. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins.** Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – Semades. Relatório Final, ago. 2011, 209 p. Disponível em <<http://naturatins.to.gov.br/plano-estadual-de-recursos-hidricos/>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

_____. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4, 3. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, ABRH, 2002. 943 p.

TUNDISI, J. G. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado.** In: Revista Ciência e Aplicação, Campinas, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003. Disponível em <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v55n4/a18v55n4.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

USGS – United States Geological Survey. **EarthExplorer.** 2017. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/fgdc/8360/SRTM1N22W016V3/>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil And Water Assesment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.** Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/19124/000717244.pdf?sequence=1>> Acesso em: 11 ago. 2016.

VAN GRIENSVEN. A.; MEIXNER. T.; GRUNWALD. S.; BISHOP. T.; DILUZIO. M.; SRINIVASAN. R. **A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models.** Journal of Hydrology. v. 324, pp. 10–23. 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.464.2518&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 abr 2017.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. **Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models.** Tans ASABE, v. 46, p. 1539-1551. 2003.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; GIONGO, M.; BESKOW, S.; SANTOS, A. F. **Modelagem Hidrológica em uma Sub-bacia Hidrográfica do Baixo Rio Araguaia, TO.** Journal of Biotechnology and Biodiversity. v. 3, n. 3: pp. 38-47. 2012. Disponível em: <<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/JBB/article/view/302/203>>. Acesso em: 18 out. 2017.

8 APÊNDICE

Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados das estações meteorológicas.

Estação	Parâmetros	Meses											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
INMET 83033	TMPMX (°C)	31,76	31,65	31,73	32,68	33,60	34,46	35,12	36,69	37,00	34,98	32,88	32,17
	TMPMN (°C)	22,28	22,24	22,42	22,57	21,95	20,27	19,79	21,24	23,43	23,07	22,59	22,52
	TMPSTDMX (°C)	2,45	2,32	2,33	2,31	2,01	1,35	1,56	1,70	2,40	2,95	2,62	2,68
	TMPSTDMN (°C)	0,97	1,10	0,98	1,04	1,54	2,24	2,62	2,73	2,21	1,53	1,14	1,00
	PCPMM (mm)	315,02	282,31	293,66	180,88	65,40	5,43	1,23	1,29	56,90	152,63	242,98	279,92
	PCPSTD (mm/dia)	15,80	16,14	16,51	11,90	6,59	1,97	0,87	0,43	7,03	11,11	15,47	15,86
	PCPSKW	2,58	2,67	3,88	2,75	4,24	13,37	20,00*	14,98	4,69	3,43	2,99	2,92
	PR_W1	0,56	0,62	0,61	0,34	0,13	0,02	0,00	0,02	0,11	0,30	0,49	0,50
	PR_W2	0,70	0,64	0,68	0,61	0,52	0,21	0,00	0,23	0,39	0,49	0,58	0,64
	PCPD	21,16	18,42	21,00	14,79	6,74	0,74	0,11	0,68	4,63	11,58	16,89	18,79
	RAINHHMX (mm)	39,86	40,43	55,45	26,08	16,37	10,84	7,48	2,98	19,52	36,10	39,22	44,64
	SOLARAV (MJ/m ² .dia)	17,68	17,44	17,05	17,60	18,08	18,94	20,02	21,73	21,21	19,66	18,60	17,86
	DEWPT (fração)	0,81	0,82	0,82	19,56	0,71	0,59	0,50	0,42	0,48	0,66	0,76	0,78
	WNDVAV (m/s)	1,19	1,06	1,03	1,04	1,20	1,65	1,94	2,20	1,80	1,45	1,18	1,14
INMET 83064	TMPMX (°C)	32,20	32,04	32,10	33,13	33,93	34,73	35,48	37,01	37,28	35,30	33,39	32,60
	TMPMN (°C)	22,82	22,66	22,80	23,14	22,35	20,40	19,85	20,74	23,18	23,67	23,22	23,09
	TMPSTDMX (°C)	2,41	2,39	2,34	2,29	1,67	1,03	1,17	1,54	2,36	2,74	2,75	2,66
	TMPSTDMN (°C)	1,17	1,25	1,10	1,08	1,51	1,77	1,79	1,95	1,70	1,46	1,24	1,19
	PCPMM (mm)	268,06	256,61	265,65	162,75	50,10	3,98	0,09	3,96	39,66	109,39	189,89	254,29
	PCPSTD (mm/dia)	15,70	14,83	14,47	12,26	6,21	1,46	0,10**	1,66	5,96	9,69	12,61	14,71
	PCPSKW	3,72	2,56	2,77	4,08	6,73	15,64	14,83	15,42	6,83	4,18	3,57	2,80
	PR_W1	0,57	0,62	0,58	0,37	0,13	0,02	0,01	0,02	0,11	0,28	0,49	0,51

Estação	Parâmetros	Meses											
		Jan											
INMET 83064	PR_W2	0,70	0,70	0,71	0,57	0,42	0,27	0,00	0,00	0,33	0,45	0,59	0,62
	PCPD	21,37	19,53	21,53	14,53	6,16	0,79	0,16	0,47	4,32	10,63	16,89	18,68
	RAINHHMX (mm)	53,54	34,23	33,48	43,30	27,42	10,03	0,25	10,38	22,82	30,90	35,54	36,25
	SOLARAV (MJ/m ² .dia)	17,47	17,33	16,92	17,77	18,05	18,80	19,99	21,60	20,04	19,07	17,91	17,30
	DEWPT (fração)	0,80	0,82	0,82	0,78	0,71	0,61	0,54	0,45	0,50	0,65	0,76	0,79
	WNDVAV (m/s)	1,04	0,97	0,87	0,85	0,81	0,85	0,88	1,00	1,12	1,10	1,01	1,07

* O pcpSTAT obteve o valor de 23,90, contudo o valor máximo permitido pelo SWAT é 20.

** O pcpSTAT obteve o valor de 0,04, entretanto o mínimo permitido pelo SWAT é 0,10.

9 ANEXO

Relação de parâmetros físico-hídricos dos solos

Parâmetro	Cambissolo	Plintossolo	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho-Amarelo	Neossolo Flúvico	Neossolo Litólico
SNAM	C	F	LV	LVA	RY	RL
NLAYERS	2	2	3	3	4	4
HYDGRP	C	D	A	A	B	B
SOL_ZMX	1000	1000	2000	2000	1400	800
ANION_EXCL	0,47	0,34	0,3	0,38	0,33	0,4
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_Z1	300	300	300	300	130	50
SOL_BD1	0,99	1,09	0,91*	0,94	1,6	1,6
SOL_AWC1	0,11	0,14	0,12	0,11	1,4	0,15
SOL_K1	874,33	553,78	612,2	1112,85	32,5	12,5
SOL_CBN1	1,58	1,14	1,67	1,69	1,7	0,4
CLAY1	49,84	37,97	53,93	57,36	13,7	17,2
SILT1	32,95	21,91	28,37	24,61	56,7	29,4
SAND1	17,2	40,13	12,94	18,03	29,6	53,4
ROCK1	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15
USLE_K1	0,02	0,03	0,01	0,01	0,16	0,17
SOL_EC1	0	0	0	0	1	0
SOL_Z2	1000	1000	1000	1000	530	300
SOL_BD2	1	1,09	0,94	0,96	1,6	1,6
SOL_AWC2	0,16	0,14	0,14	0,13	1,2	0,15
SOL_K2	262,52	553,78	461,07	401,26	12,5	12,5
SOL_CBN2	0,72	1,14	1,01	0,95	0,5	0,6
CLAY2	49,16	37,97	66,28	64,37	13,39	24,7
SILT2	34,31	21,91	22,93	20,54	46	25,6
SAND2	16,53	40,13	10,79	15,09	40,7	49,7

Parâmetro	Cambissolo	Plintossolo	Latossolo Vermelho	Latossolo Vermelho-Amarelo	Neossolo Flúvico	Neossolo Litólico
ROCK2	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15
USLE_K2	0,02	0,03	0,01	0,01	0,18	0,16
SOL_EC2	0	0	0	0	0	0
SOL_Z3	0	0	2000	2000	960	301
SOL_BD3	0	0	0,94	0,96	1,5	1,6
SOL_AWC3	0	0	0,14	0,13	1,4	0,15
SOL_K3	0	0	142,32	230,05	12,5	12,5
SOL_CBN3	0	0	1,01	0,95	1,3	0,6
CLAY3	0	0	66,28	64,37	23	24,7
SILT3	0	0	22,93	20,54	68,1	25,6
SAND3	0	0	10,79	15,09	8,9	49,7
ROCK3	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB3	0	0	0,15	0,15	0,16	0,15
USLE_K3	0	0	0,01	0,01	0,27	0,16
SOL_EC3	0	0	0	0	0	0
SOL_Z4	0	0	0	0	1400	800
SOL_BD4	0	0	0	0	1,5	1,3
SOL_AWC4	0	0	0	0	1,4	0,18
SOL_K4	0	0	0	0	12,5	12,5
SOL_CBN4	0	0	0	0	0,6	0,76
CLAY4	0	0	0	0	27,7	32
SILT4	0	0	0	0	67,4	35
SAND4	0	0	0	0	14,95	33
ROCK4	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB4	0	0	0	0	0,15	0,15
USLE_K4	0	0	0	0	0,25	0,16
SOL_EC4	0	0	0	0	0	0

*O valor indicado por Lima et al. (2013) é de 0,90, porém o mínimo permitido pelo programa é maior que 0,90.

Fonte: Baldissera (2005) e Lima et al. (2013).