



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, NATUREZA E  
DESENVOLVIMENTO  
DOUTORADO EM SOCIEDADE NATUREZA E DESENVOLVIMENTO

**EDINELSON SALDANHA CORREA**

**SIMULAÇÃO DA VAZÃO DO RIO TAPAJÓS UTILIZANDO MODELO DE SWAT  
COM DIFERENTES ENTRADAS PEDOLÓGICAS E CLIMÁTICAS**

SANTARÉM  
2018

**EDINELSON SALDANHA CORREA**

**SIMULAÇÃO DA VAZÃO DO RIO TAPAJÓS UTILIZANDO MODELO DE SWAT  
COM DIFERENTES ENTRADAS PEDOLÓGICAS E CLIMÁTICAS**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de doutor, pelo Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento da Universidade Federal do Oeste do Pará.

Orientador: Prof. Dr. David Mcgrath

Coorientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

SANTARÉM  
2018

**EDINELSON SALDANHA**

**SIMULAÇÃO DA VAZÃO DO RIO TAPAJÓS UTILIZANDO MODELO DE SWAT  
COM DIFERENTES ENTRADAS PEDOLÓGICAS E CLIMÁTICAS**

Tese apresentada como requisito para a  
obtenção do título de doutor, pelo Programa de  
Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e  
Desenvolvimento da Universidade Federal do  
Oeste do Pará.

Orientador: Prof. Dr. David McGraft

Coorientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de  
Melo Ribeiro

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. David Gibbs McGrath – UFOPa

---

Prof. Dr. Jose Mauro Sousa de Moura – UFOPa

---

Prof. Dr. Keid Nola Silva Sousa – UFOPa

---

Prof. Dr. Rodolfo Maduro – UFOPa

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Lucieta Guerreiro Martorano – EMBRAPA

---

Prof. Dr. Jarsen Luis Castro Guimaraes - UFOPa

SANTARÉM

2018

À minha mãe TEREZA SALDANHA e ao  
parceiro da vida THIAGO SHINAIGGER,  
pelo amor incondicional e apoio em todos os  
momentos da minha vida. Obrigado  
simplesmente por existirem, meus anjos da  
guarda.

“O essencial é invisível aos olhos”.

Saint-Exupéry

## AGRADECIMENTOS

À Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Pará (EMATER-PA), pela autorização e dispensa dos serviços nos últimos quatro anos para realização do curso de doutorado.

À Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPa, em especial à primeira coordenadora do curso de doutorado em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Profa. Dra. Tereza Ximenes e ao servidor Euclides Ribeiro.

Aos Professores orientadores, Prof. Dr. David Gibbs McGrath e Celso Bandeiras pela ajuda durante todo processo de modelagem em SWAT.

Ao professor Prof. Dr. José Mauro Sousa pelos momentos de conversa na idealização deste projeto de tese.

Aos amigos que construíram juntamente comigo, o percurso do doutorado Gina do Valle e Ana Maria Sarmiento. Obrigado pelo apoio em todos os momentos.

*Muito Obrigado!*

## RESUMO

As mudanças nos ecossistemas aquáticos geradas pela agricultura, pecuária, extração madeireira, garimpagem e as barragens hidrelétricas, têm proporcionado a degradação dos recursos naturais, bem como modificações nos recursos hídricos e sistemas fluviais. Dessa forma, o conhecimento prévio do efeito das variações no uso do solo, sobre a dinâmica das águas em bacias hidrográficas, são importantes para prever, mitigar e/ou eliminar atividades e intervenções com impactos negativos. A bacia do rio Tapajós, uma das principais do sistema amazônico, possui em sua extensão diversas atividades degradantes ao meio ambiente, como a pecuária, agricultura e a extração de madeira. Nesse contexto, os modelos hidrológicos são importantes ferramentas para avaliar o impacto que diferentes práticas de agricultura e diferentes usos e ocupação causam na erosão do solo e sua influência na vazão dos rios em função das condições climáticas do local. O presente trabalho teve como objetivo mostrar se o modelo de SWAT é capaz de prever a vazão da bacia do rio Tapajós de forma eficiente, avaliando diferentes bases de dados de entrada (pedológicas e climáticas). Desta forma foram realizados levantamento de dados climáticos, tais como precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade média de vento, umidade relativa do ar e de dados geocartográficos, como uso e ocupação do solo, tipo de solo e modelo numérico de terreno, que serviram para caracterização e delimitação da área da bacia hidrográfica. Três pontos fluviométricos foram usados Acará dos Tapajós (17650002), Fazenda Tratex (1730000) e Jardim do Ouro (17675000) com séries entre 01/01/1999 a 01/01/2002, duas entradas pedológicas diferentes *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), e duas entradas de parâmetros climáticos Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) foram utilizados nesta tese, na busca por qual delas originariam resultados mais próximos dos observados. Na simulação sem calibração, as estações fluviométricas Acará dos Tapajós (17650002), Itaituba (17730000) e Jardim do Ouro (17675000), todos os valores foram superestimados, entretanto seguiram a mesma tendência dos valores observados, gerando valores de PBIAS (Porcentagem de BIAS) e COE (Coeficiente de Eficiência de *Nasch - Sutcliffe*) insatisfatórios, demonstrando assim a necessidade da calibração do modelo para melhores resultados. Na determinação dos parâmetros hidrológicos os tiveram maior influência na modelagem segundo a análise de sensibilidade global, foram aqueles relacionados diretamente com os escoamentos superficial e subterrâneo, sendo eles: CN2, RCHRG\_DP, GW\_DELAY e CH\_N2, entre eles o parâmetro apresentando maior sensibilidade e importância para determinação do volume de escoamento superficial direto da vazão do rio Tapajós foi o CN2, ou seja, o número da curva inicial para a condição de umidade II para quase todas as combinações de dados de entrada. Após calibrados, a simulação usando dados climáticos INMET-EMBRAPA, foram obtidos valores de COE (0.81, 0.86 e 0.79) considerados muito bons e superiores quando comparados com os demais resultados das simulações usando as outras entradas. Mostrando assim que o modelo possui boa correlação com os dados reais, portanto, representando o comportamento hidrológico da bacia do rio Tapajós.

**Palavras-chave:** Simulação de vazão. Sistemas de Informação Geográfica. SWAT. Uso do solo.

## ABSTRACT

### SIMULATION OF THE TAPAJÓS RIVER FLOW USING SWAT MODEL WITH DIFFERENT PEDOLOGICAL AND CLIMATIC ENTRIES.

Changes in aquatic ecosystems generated by agriculture, livestock, logging, mining and hydroelectric dams have provided the degradation of natural resources, as well as changes in water resources and river systems. Thus, prior knowledge on the effect of variations of land use regarding the dynamics of waters in river basins are important to predict, mitigate and/or eliminate activities and interventions with negative impacts. The Tapajós River Basin, which is one of the main Amazon basins, has several activities that degrade the environment along its extension such as livestock farming, agriculture and logging. In this context, hydrological models are important tools to assess the impact that different farming practices and different uses and occupations cause in the soil erosion and their influence on the flow of the rivers due to the local climatic conditions. This work aimed to show if the SWAT model can efficiently predict the flow of the Tapajós river basin, evaluating different (pedological and climatic) input databases. In this way, we conducted a survey of climatic data involving climatic data such as precipitation, maximum and minimum temperature, average wind speed, relative humidity, as well as geocartographic data such as land use and occupation, soil type and numerical terrain model, which were used for the characterization and delimitation of the hydrographic basin. Three fluviometric points were used: Acará dos Tapajós (17650002), Fazenda Tratex (1730000) and Jardim do Ouro (17675000) with series between 01/01/1999 and 01/01/2002. Two different pedological inputs - Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) - and two inputs of climatic parameters - Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) and Global Precipitation Climatology Project (GPCP) - were used in this thesis to determine which one would give results closer to those that were observed. In the simulation without calibration, the fluvial stations Acará dos Tapajós (17650002), Itaituba (17730000) and Jardim do Ouro (17675000), all values were overestimated but they followed the same trend of observed values, providing unsatisfactory values for PBIAS (Percentage of BIAS) and COE (Nash - Sutcliffe Efficiency Coefficient), demonstrating therefore the need of model calibration for better results. In the determination of the hydrological parameters, the ones that presented greater influence on modeling according to the global sensitivity analysis were those directly related to surface and underground flows: CN2, RCHRG\_DP, GW\_DELAY and CH\_N2. Among them, CN2 presented greater sensitivity and importance for determining the direct flow volume of the Tapajós river flow, i.e., the number of the initial curve for the humidity condition II for almost all combinations of input data. After calibration, the simulation using INMET-EMBRAPA climatic data resulted in values of COE (0.81, 0.86 and 0.79) considered very good and superior when compared to the other results of the simulations using the other inputs. This shows that the model has a good correlation with the actual data and, therefore, represents the hydrological behavior of the Tapajós river basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico .....	18
Figura 2 - Representativo da delimitação de uma bacia hidrográfica.....	20
Figura 3 - Análise da evolução do rebanho bovino (linha azul) e taxa de desmatamento (linha vermelha) na Amazônia Legal entre 1989 e 2014 .....	29
Figura 4 - Evolução da área colhida (milhões de hectares) de lavouras temporárias na Amazônia Legal, entre 1990 e 2013 .....	31
Figura 5 - Composição das unidades de resposta hidrológica (URH) a partir dos mapas das unidades pedológicas: os usos, ocupação do solo e a topografia.....	38
Figura 6 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Tapajós .....	44
Figura 7 - Fluxograma de síntese do processo metodológico.....	46
Figura 8 - Processo de funcionamento do SWAT adaptado de Machado (2002).....	53
Figura 9 - Modelo conceitual da profundidade da camada.....	56
Figura 10 - Triângulo de classificação textural do solo.....	57
Figura 11 - Mapa das Unidades pedológicas para bacia do rio tapajós segundo a EMBRAPA .....	62
Figura 12 - Mapa das unidades pedológicas para bacia do rio Tapajós segundo a FAO .....	67
Figura 13 - Fluxograma de geração de parâmetros de solo .....	69
Figura 14 - Mapa das isozonas de igual relação .....	78
Figura 15 - Localização das estações climática .....	80
Figura 16 - Localização das estações fluviométricas (Vazões) .....	82
Figura 17: Esquema de funcionamento do SWAT .....	83
Figura 18: Alternativas de definição de URH's.....	84
Figura 19: Fluxo das diferentes entradas de dados .....	91
Figura 20 - Comparação gráfica entre as alterações de uso e ocupação do solo nos anos de 2001 e 2007 .....	92
Figura 21 - Uso e ocupação do Solo na bacia do rio Tapajós para o ano de 2007 .....	93
Figura 22 - Mapa de altimetria e mapa de declividade.....	94
Figura 23 - Mapa da distribuição do uso e ocupação do Solo na bacia do rio Tapajós para o ano de 2001 .....	96
Figura 24: Índice de COE para simulações não calibradas.....	98
Figura 25: Porcentagem de BIAS para simulações não calibradas.....	99

Figura 26 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para estação fluviométrica Acará do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores não calibrados .....	101
Figura 27 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para estação fluviométrica Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores não calibrados .....	102
Figura 28 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para a estação fluviométrica Fazenda Tratex (sub-bacia 172) com os valores não calibrados.....	102
Figura 29 - Resultado da análise de sensibilidade global para bacia do rio Tapajós, ranqueando os parâmetros mais sensíveis em ordem crescente.....	104
Figura 30 - Índices de COE para simulações calibradas.....	107
Figura 31 - Porcentagens de BIAS para simulações calibradas.....	108
Figura 32 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Acara do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores calibrados .....	110
Figura 33 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores calibrados .....	111
Figura 34 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Fazenda Tratex (sub-bacia 172), com os valores calibrados.....	111
Figura 35 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Acará do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores calibrados .....	113
Figura 36 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores calibrados .....	113
Figura 37 - Dados plotados da vazão observada e vazão simulada para Fazenda Tratex (sub-bacia 172), com os valores calibrados .....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das criações de animais (milhões de cabeças) e variação percentual entre 1995 e 2013 na Amazônia Legal. ....	28
Tabela 2 - Descrição das bandas do LANDSAT 7 .....	47
Tabela 3 - Composições RGB de imagens Landsat.....	48
Tabela 4 - Origem da base de dados .....	50
Tabela 5 - Classes de Declividades.....	52
Tabela 6 - Classificação textural e densidade aparente do solo.....	56
Tabela 7 - Classificação textural e capacidade de água no solo .....	58
Tabela 8 - Classificação textural e condutividade hidráulica .....	59
Tabela 9 - Classificação granulométricas do solo.....	61
Tabela 10 - Classes pedológicas distribuídas, segundo classificação EMBRAPA e a área (%) ocupada na bacia do rio Tapajós.....	63
Tabela 11 - Origem dos parâmetros pedológicos, conforme classificação da Embrapa .....	64
Tabela 12 - Características Físicas das classes de solo, segundo a classificação da EMBRAPA .....	65
Tabela 13 – Classes de solo distribuídas segundo classificação FAO e a área (%) ocupada na bacia do rio Tapajós.....	67
Tabela 14 - Origem dos parâmetros de solo, conforme classificação proposta da FAO .....	68
Tabela 15 - Características físico-hídricas das classes de pedológicas, segundo a classificação da FAO.....	70
Tabela 16 - Descrição dos parâmetros climáticos.....	71
Tabela 17 - Valores de “K” em função do intervalo de recorrência utilizado e o coeficiente de assimetria (Skew).....	75
Tabela 18 - Correções para as isozonas de igual relação.....	79
Tabela 19 - Estações Climáticas .....	79
Tabela 20 - Estações fluviométricas, códigos oficiais das estações .....	81
Tabela 21 - Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade .....	88
Tabela 22 - Desempenho dos valores de COE e PBIAS .....	91
Tabela 23 - Distribuição do uso e ocupação do solo .....	95
Tabela 24 - Média, limite máximo e mínimos das vazões, expressas em m <sup>3</sup> /s .....	101
Tabela 25 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação .....	106

Tabela 26 - Média, limite máximo e mínimos das vazões.....	110
Tabela 27 - Índice de COE e porcentagem em BIAS .....	112

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE O CICLO HIDROLÓGICO.....	18
2.1.1	Ciclo hidrológico e balanço hídrico em uma bacia hidrográfica .....	18
2.1.2	Os Efeitos das Alterações do Uso e Ocupação do Solo sobre as Componentes do Ciclo Hidrológico .....	22
2.2	ASPECTOS GERAIS SOBRE DINAMICA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA AMAZÔNIA LEGAL.....	26
2.2.1	A Pecuária.....	27
2.2.2	Agricultura na Amazônia Legal.....	29
2.3	O MODELO HIDROLÓGICO DE <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> (SWAT).....	35
2.3.1	<b>Aplicações do Modelo SWAT no Brasil.....</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	44
4.2	DIAGRAMA DE SÍNTESE METODOLÓGICA.....	45
4.2.1	<b>Aquisição de Imagens .....</b>	<b>46</b>
4.2.2	<b>Tratamento de Imagens.....</b>	<b>46</b>
4.2.3	<b>Seleção de Bandas .....</b>	<b>47</b>
4.2.4	<b>Composição Colorida.....</b>	<b>47</b>
4.2.5	<b>Classificação de Imagens.....</b>	<b>48</b>
4.2.6	<b>Classificação Supervisionada.....</b>	<b>49</b>
4.2.7	<b>Uso e ocupação do Solo.....</b>	<b>49</b>
4.2.8	<b>Aquisição de Bases Vetoriais.....</b>	<b>50</b>
4.2.9	<b>Unidades Pedológicas .....</b>	<b>50</b>
4.2.10	<b>Aquisição de Cartas Topográficas.....</b>	<b>51</b>
4.2.11	<b>Modelos Digitais de Elevação.....</b>	<b>51</b>
4.2.12	<b>Rede de Drenagem .....</b>	<b>52</b>
4.3	DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO DE SWAT .....	52
4.3.1	<b>Modelo Numérico de Terreno (MNT).....</b>	<b>54</b>

<b>4.3.2</b>	<b>Mapa Pedológico .....</b>	<b>54</b>
4.3.2.1	Grupos Hidrológicos (HYDGRP).....	54
4.3.2.2	Profundidade de Raiz (SOL_ZMX).....	55
4.3.2.3	Porosidade (ANION_EXCL).....	55
4.3.2.4	Profundidade da Camada (SOL_Z) .....	55
4.3.2.5	Densidade Aparente (SOL_BD) .....	56
4.3.2.6	Capacidade de Água no Solo (SOL_AWC).....	57
4.3.2.7	Condutividade Hidráulica Saturada (SOL_K) .....	58
4.3.2.8	Erodibilidade (USLE_K) .....	59
4.3.2.9	Albedo (SOL_ALB).....	60
4.3.2.10	Carbono Orgânico (SOL_CBN) .....	60
4.3.2.11	Porcentagem de Argila, Silte, Areia e Seixo .....	61
4.3.2.12	Origem das Entradas Pedológicas.....	61
<b>4.3.3</b>	<b>Mapa de Uso e Ocupação do Solo.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Parâmetros Climáticos .....</b>	<b>71</b>
4.3.4.1	Parâmetros Climáticos .....	72
4.3.4.2	Temperatura no Ponto de Orvalho .....	73
4.3.4.3	Radiação Solar .....	74
4.3.4.4	Estimativas de Precipitação .....	74
4.3.4.5	Origens das Entradas Climáticas .....	79
4.3.4.5.1	Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) .....	79
4.3.4.5.2	Global Precipitation Climatology Project (GPCP) .....	81
<b>4.3.5</b>	<b>Dados Fluviométricos (Vazões dos Rios) .....</b>	<b>81</b>
<b>4.4</b>	<b>PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT .....</b>	<b>83</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Delimitação e discretização da bacia.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Unidades de Resposta Hidrológica.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Período de aquecimento do modelo.....</b>	<b>85</b>
<b>4.5</b>	<b>CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT .....</b>	<b>85</b>
<b>4.5.1</b>	<b>SWAT-CUP .....</b>	<b>86</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Análise de Sensibilidade .....</b>	<b>86</b>
<b>4.6</b>	<b>COMBINAÇÕES ENTRE AS ENTRADAS PEDOLÓGICA E CLIMÁTICAS.....</b>	<b>91</b>
<b>4.7</b>	<b>SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS .....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>
5.1	PLANOS DE INFORMAÇÕES .....	94

5.1.1	Modelo Numérico do Terreno (MNT).....	94
5.1.2	Uso e Ocupação do Solo.....	95
5.2	DEFINIÇÃO DAS SUB-BACIAS E CURSOS DE ÁGUA.....	97
5.3	AVALIAÇÃO DA MODELAGEM INICIAL.....	97
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	103
5.5	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	106
5.6	CENÁRIO DE USO DO SOLO EM 2007.....	112
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes debates mundiais do século XXI é a questão hídrica, no que diz respeito à falta do recurso água. Este problema já assola a grande maioria dos africanos e começa a afetar os países europeus. O Brasil, no entanto, habituou-se a ilusão de que tal problema não o afetaria, por ser considerado uma das grandes potências hídricas do planeta. Todavia, em 2014, o estado de São Paulo começa a sofrer com a escassez de água, tendo que fazer racionamento do recurso.

Atualmente já se sabe que o uso dado ao solo, em conjunto com as características geomorfológicas da área de abrangência da bacia hidrográfica, é que definirá seu comportamento frente a eventos hidrológicos, como a precipitação, escoamento superficial e subterrâneo, evapotranspiração e infiltração, podendo indicar, por exemplo, uma maior ou menor tendência a enchentes. Diversos pesquisadores têm trabalhado acerca deste tema:

Costa et al. (2007) e Coe et al. (2009) relatam que análises do comportamento de bacias hidrográficas em micro ( $<1\text{km}^2$ ), meso (centenas de  $\text{km}^2$ ) e grande escala (milhares de  $\text{km}^2$ ) revelam que o desmatamento reduz a evapotranspiração (ET), aumenta a descarga do canal, bem como o coeficiente de Runoff<sup>1</sup>;

Costa et al. (2003) explicam que a menor rugosidade da superfície, a menor área de folhagem (relação entre superfície com folha e superfície total) e a menor profundidade das raízes das pastagens, quando comparadas à floresta contribuem para reduzir a ET e aumentar a vazão (Q).

Com isso, a problemática da degradação ambiental tornou-se um assunto frequente, a relação predatória com a qual o homem se relacionou com a natureza resultou em impactos negativos sobre os sistemas naturais, sendo os recursos hídricos os que sofrem maior pressão. Para amenizar tais problemáticas e assim garantir o acesso à água em quantidade e qualidade a todos, surge a política nacional de recursos hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997), tendo como foco a gestão dos recursos hídricos, que criou instrumentos como plano de recursos hídricos, enquadramento de corpos de água em classes, outorgas de uso entre outros.

Entretanto, para a realização de um gerenciamento de uma bacia hidrográfica é necessário um conjunto de informações de cunho ambiental, tais como as classes pedológicas, os diferentes usos e ocupação do solo, topografia, as projeções de cenários futuros, bem como as relações sociais e econômicas existentes na área. Segundo Machado (2002), uma

---

<sup>1</sup> Coeficiente Runoff ou coeficiente de deflúvio é definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado. Este coeficiente pode ser relativo a uma chuva isolada ou relativo a um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram.

investigação no sistema real, envolvendo medições de todas as variáveis que influenciam a dinâmica de uma bacia hidrográfica é uma tarefa árdua já que o longo prazo exigido e os custos de medições e monitoramento são grandes empecilhos para tal tarefa. Desta forma, a modelagem surge com uma alternativa importante para a obtenção de informações sobre a dinâmica de uma bacia hidrográfica, trazendo consigo não somente um diagnóstico ambiental parcial inicial, mas gerando cenários futuros, cumprindo desta forma partes do que preconiza a política nacional de recursos hídricos (Lei nº 9.943, de 08 de janeiro de 1997).

Por meio da modelagem hidrológica é possível estimar cenários futuros de uso e ocupação do solo e conseqüentemente a demanda por recursos naturais, avaliando o grau de comprometimento dos recursos da bacia em foco. Ressalta-se ainda que o uso da modelagem a partir da inserção de diferentes cenários de uso e manejo do solo pode contribuir para o planejamento do uso racional dos recursos hídricos e, posteriormente fornecer suporte à implementação de práticas conservacionistas para um desenvolvimento sustentável (DURÃES, 2010).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é utilizado para modelar diferentes processos físicos em bacias hidrográficas com o objetivo de estudar alterações no uso do solo e suas conseqüências nos escoamentos superficial e subterrâneo, na produção de sedimentos e na qualidade da água. Além disso, esse modelo também utiliza imagem digital para delimitar bacias hidrográficas (SRINIVASAN et al., 1994).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MUDANÇA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE O CICLO HIDROLÓGICO

Para se discutir os efeitos que as diferentes alternativas de uso e ocupação do solo podem provocar sobre o ciclo hidrológico, faz-se necessário revisar alguns aspectos gerais dos processos que o compõem.

#### 2.1.1 Ciclo hidrológico e balanço hídrico em uma bacia hidrográfica

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela radiação solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2000). Entretanto, destaca-se que o ciclo só é fechado a nível global, uma vez que o que é evaporado em certo local, não necessariamente precipitará no mesmo local, podendo se movimentar e vir a precipitar em outra área.

Desta forma, o ciclo hidrológico se constitui basicamente em um processo contínuo de transporte de massas d'água de mananciais (lagos, rios, oceanos) para a atmosfera, posteriormente, através de precipitações, escoamento (superficial e subterrâneo) volta novamente para os mananciais. O ciclo hidrológico tem nos fenômenos de evaporação, evapotranspiração e precipitação, os seus principais elementos responsáveis pela contínua circulação de água no globo (figura 1).

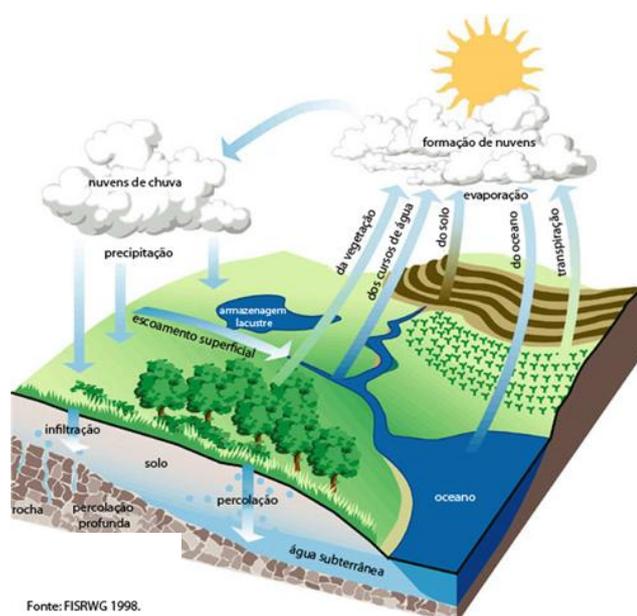


Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico  
 Fonte: <http://homepage.ufp.pt/biblioteca/WebThesaurus/Pages/PageC1.html>,

De acordo com Tucci (2000), o fluxo hídrico sobre a superfície terrestre é positivo (precipitação menos evaporação), resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos. O fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação. O volume evaporado adicional se desloca para os continentes através do sistema de circulação da atmosfera e precipita, fechando o ciclo.

Pode-se começar a descrever o ciclo a partir do vapor d'água presente na atmosfera que, simplificada, condensa-se e leva à precipitação, principal forma de transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre. A água que atinge o solo tem diferentes destinos. Parte infiltra-se no interior do solo cuja umidade é aproveitada pelos vegetais que a absorvem pelas raízes e a devolvem à atmosfera por transpiração. O que os vegetais não aproveitam percola para o lençol freático, contribuindo para o escoamento de base dos rios. A infiltração é assim importante para regular a vazão dos rios, distribuindo-a ao longo de todo o ano, evitando, assim, os fluxos repentinos que provocam inundações.

Uma segunda parte da água precipitada sobre a superfície terrestre promove o escoamento superficial em direção às áreas de altitudes mais baixas, alimentando diretamente os lagos, riachos, rios, mares e oceanos, caindo sobre uma superfície coberta com vegetação, parte da chuva fica retida nas folhas. A água interceptada evapora, voltando à atmosfera na forma de vapor (TUCCI, 2000). Pode-se então identificar os seguintes processos componentes do ciclo (figura 1):

- a) precipitação: consiste no vapor de água condensado que cai sobre a superfície terrestre;
- b) infiltração: fluxo de água da superfície para o interior do solo;
- c) escoamento superficial: é o movimento das águas na superfície terrestre em razão da gravidade;
- d) evaporação: transformação da água no seu estado líquido para o estado gasoso;
- e) transpiração: é a forma como a água existente nos vegetais se transforma em vapor d'água;
- f) evapotranspiração: é o processo conjunto pelo qual a água precipitada sobre a superfície volta à atmosfera através da transpiração dos vegetais ou pela evaporação direta (quando não absorvida) e;
- g) condensação: é a transformação do vapor de água em água líquida, com a criação de nuvens e nevoeiro.

Conforme afirma Tucci (2000), o ciclo hidrológico é normalmente estudado com

maior interesse na fase terrestre, em que o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica, a qual é definida por ele, como uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

Dessa forma, ela é composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório. A figura 2 exemplifica uma bacia hidrográfica hipotética, na qual a drenagem converge para o exutório, representado pela seção transversal "A" do rio.

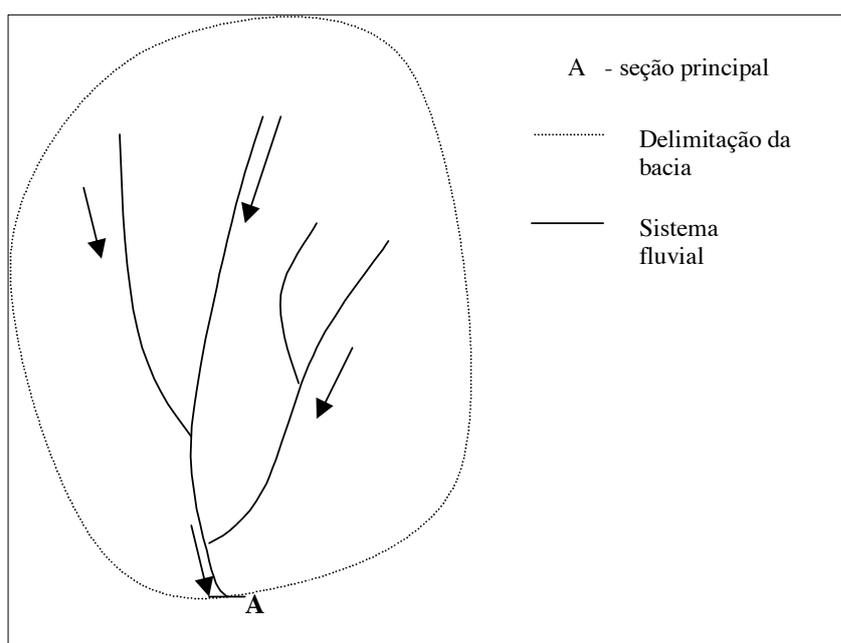


Figura 2 - Representativo da delimitação de uma bacia hidrográfica  
Fonte: Tucci (2000).

Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de bacia hidrográfica envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água.

Em hidrologia, balanço hídrico é o resultado da quantidade de água que entra e sai de uma certa porção do solo em um determinado intervalo de tempo. Devido ao fato de que a quantidade total de água disponível na terra é finita e indestrutível, podemos encarar o ciclo hidrológico global como sendo um sistema fechado. Um balanço hídrico pode ser desenvolvido para explicar os componentes hidrológicos e expresso pela equação 1:

$$P - ET - R - I \pm \Delta A = 0 \quad (1)$$

Sendo: P: precipitação,

I: infiltração,

ET: evapotranspiração,

R: escoamento superficial da água

$\Delta A$ : variação da água armazenada no solo.

Para um período longo (acima de um ano) admite-se que a quantidade de água armazenada no solo não varia significativamente, ou seja,  $\Delta A$  será igual a zero, simplificando a expressão para a forma:

$$P - ET - R - I = 0 \quad (2)$$

Por sua vez, para uma bacia de grande extensão, na qual a área da bacia superficial coincidirá com a drenagem subterrânea, admite-se que todo o escoamento subterrâneo convergirá para o mesmo ponto que as águas superficiais, ou seja, haverá um único exutório para a bacia, para o qual toda a drenagem (superficial e subterrânea) estará convergindo. Dessa forma, a parcela “infiltração”, para um período longo em uma bacia de grande escala, se subdividirá em parcela “evaporação” (incorporada à parcela ET) e escoamento subterrâneo (o qual converge para o exutório), de modo que a equação 2 passa a ser reescrita como:

$$P - ET - Q = 0 \quad (3)$$

Onde “Q” representa a descarga que passa por aquela seção (exutório).

Desta forma, o entendimento das alterações ocorridas em um dos parâmetros estará associado ao entendimento das mudanças verificadas nos demais.

A evaporação e a evapotranspiração ocorrem quando a água líquida é convertida para vapor de água e transferida, neste estado, para a atmosfera. O processo ocorre naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera ou de ambos e, será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga da superfície da Terra.

O sol emite radiações de onda curta, da qual parte é absorvida, refletida ou dispersa pela atmosfera, de modo que apenas parte atinge a superfície da terra. Da parcela que atinge a superfície da Terra, parte é refletida (albedo) e parte é absorvida (TUCCI, 2000). Da parcela

absorvida, uma parte retorna na forma de comprimento de onda longa (onda térmica).

Garcez; Alvarez (1999) explicam que apesar da radiação solar ser a fonte primária de energia do ciclo hidrológico, uma vez que o ar quente e seco absorve pouco as radiações de médio e pequeno comprimento de onda, o aquecimento da atmosfera acaba se dando, principalmente nas camadas inferiores, graças à “emissão secundária” da superfície terrestre, que absorve a energia de ondas curtas e emana energia de ondas longas (mais facilmente absorvidas pelo vapor d’água e pelo gás carbônico).

A evaporação é controlada pela diferença de tensão de vapor na atmosfera e depende da temperatura próxima da superfície, logo, será influenciada pelas quantidades de energia refletida (albedo) e absorvida pela superfície terrestre. A energia empregada neste processo de mudança de fase (de líquido para gasoso) é denominada calor latente de vaporização.

### **2.1.2 Os Efeitos das Alterações do Uso e Ocupação do Solo sobre as Componentes do Ciclo Hidrológico**

Diversos estudos apontam que as alterações do uso e ocupação do solo causam modificações no ciclo hidrológico, entre estes destacam-se:

Observações de campo (GASH; 1979 ) e simulações numéricas (NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991; COSTA et al., 2007; COSTA; FOLEY, 2000; SAMPAIO et al., 2007; COE; COSTA; SOARES FILHO, B.S., 2009) mostram que o desmatamento em bacias hidrográficas poderia provocar alterações no ciclo hidrológico, afetando clima, vazão e precipitação em dimensões regionais e globais.

Costa; Foley (2000) afirmam que numerosos estudos têm usado modelos gerais de circulação atmosférica para examinar os possíveis efeitos do desmatamento na Amazônia sobre o clima global e regional, com todas as simulações mostrando um decréscimo significativo na evapotranspiração e a maior parte deles indicando um decréscimo significativo da precipitação sobre a bacia Amazônica.

Coe; Costa; Soares Filho (2009), em seu trabalho apresentam resultados de simulações numéricas. Mostra que se for considerado constante a atual taxa de precipitação, em escala continental, o desmatamento em larga escala (maior que 30% da bacia amazônica), pode causar mudança no balanço hídrico, não estando limitadas apenas àquelas bacias onde o desmatamento ocorre, mas que se espalham de forma desigual em toda a Amazônia por meio da circulação atmosférica.

Nobre; Sellers; Shukla (1991) realizaram simulações de cenários com floresta e

desmatamento, utilizando um modelo numérico acoplado da atmosfera e da biosfera para avaliar os efeitos do desmatamento da Amazônia sobre o clima regional e global. O experimento de controle no estudo foi conduzido usando como condição de contorno a região Amazônica coberta com floresta tropical e o resultado mostrou que tal cenário era razoavelmente bem simulado pelo modelo. Logo, mostrando que, quando a floresta amazônica era substituída no modelo por pastagem, ocorria um decréscimo de cerca de 30% na evapotranspiração anual, de 25% na precipitação e de 20% no coeficiente de *Runoff* da região. Ainda de acordo com tais simulações, as mudanças seriam maiores para a estação seca, na porção sul da Amazônia.

Nobre; Sellers; Shukla (1991) explicam que a absorção de radiação solar é reduzida na situação desmatada em razão do maior albedo da superfície, nesta situação a energia radioativa efetiva disponível na superfície para ser dividida entre fluxos de calor latente e de calor sensível se torna bem menor no caso desmatado, adicionalmente, o menor índice de área de folhagem e a menor capacidade de estocagem de umidade do solo na situação desmatada têm como efeito a redução da taxa média de transpiração. Ainda, no caso de desmatamento, ocorre menos interceptação da precipitação com isso, menor evaporação, uma vez que a rugosidade da superfície é menor. A redução na transpiração e as perdas na interceptação da situação desmatada implicam que, comparado à condição de floresta, uma maior proporção da energia radioativa efetiva se converte em calor sensível.

Nobre; Sellers; Shukla (1991) explicam ainda que seria muito provável que o coeficiente de *Runoff* superficial aumentasse para uma área específica na qual a floresta primária seja substituída por uma cobertura vegetal de pequeno porte. Também seria muito provável que o coeficiente de *Runoff* superficial da bacia Amazônica aumentaria após desmatamento em escala muito grande se alguém pudesse afirmar com confiança que a precipitação permanecesse inalterada ou aumentasse. Entretanto, os mesmos esclarecem que resultados de simulações sugerem que a redução nas taxas de precipitação da Bacia Amazônica seriam maiores que a redução na evapotranspiração, o que implicaria que o coeficiente de *Runoff* deveria de fato decrescer na escala da bacia.

Segundo Costa; Foley (2000) há expectativa de que a bacia Amazônica irá experimentar pelo menos duas mudanças ambientais principais no próximo século: áreas cada vez maiores de floresta sendo convertidas para pastagem e agricultura, e ainda o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Dessa forma, um modelo de circulação geral atmosférico e um simulador integrado de biosfera seriam necessários para determinar os efeitos combinados do desmatamento de larga-escala com as concentrações maiores de CO<sub>2</sub> sobre o

clima Amazônico. Quanto ao desmatamento, foram realizadas simulações em duas situações distintas: um cenário com floresta e outro no qual aquela fosse substituída por pastagem. Os resultados do experimento considerado “controle” (cenário com floresta e nível de CO<sub>2</sub> nos padrões atuais) são comparados com outros resultados relatados na literatura (obtidos por meio de dados de campo ou por simulações), concluindo que, de modo geral, os resultados encontrados são satisfatórios/razoáveis. Especificamente, sobre o efeito do desmatamento, as simulações realizadas indicaram que o desmatamento provocaria uma redução da precipitação sobre a bacia da ordem de 0,73mm/dia.

Em relação à evapotranspiração, Costa; Foley (2000) também corroboram com as explicações já mencionadas anteriormente, de que o desmatamento provoca um decréscimo significativo na mesma, por meio de mudanças no albedo, rugosidade reduzida, raízes menos profundas e menor área de folhagem.

Com o objetivo de avaliar se as conversões de floresta para pastagem ou para monocultura de soja teriam o mesmo impacto sobre o clima, Costa et al. (2007) aplicaram dados de refletividade de cada atividade agropecuária em um modelo climático e simularam os efeitos decorrentes da substituição de floresta pelas mesmas. Apesar de encontrarem que ambas as atividades provocariam redução de pluviometria na região, os resultados indicaram que no caso da substituição por soja os efeitos seriam bem mais significativos, com redução de chuvas de 15,7%, enquanto na substituição por pastagens, a queda de precipitação seria de 3,9%, esta diferença está relacionada com o maior albedo da plantação de soja, que absorve menos radiação solar do que o pasto ou a floresta, diminuindo a disponibilidade de energia radioativa efetiva. Dessa forma, há uma diminuição das precipitações, pois as chuvas na região dependem principalmente da evapotranspiração, que é função da parcela de calor latente disponível (COSTA et al., 2007).

Sampaio et al. (2007) corroboram que o desmatamento em larga escala na Amazônia poderia alterar o clima regional significativamente. Tal efeito ocorreria porque a substituição de florestas por pastagens e plantações, as quais têm menor albedo e menor demanda de água, levaria a um decréscimo na radiação efetiva na superfície e menor convergência de umidade sobre a bacia. Tais conclusões decorrem do trabalho em que Sampaio et al. (2007) usaram um modelo global de circulação atmosférica para avaliar os efeitos que o desmatamento da Amazônia teria sobre o clima regional, utilizando mapas de uso e cobertura do solo simulados para um cenário de desmatamento futuro, no qual a floresta seria gradualmente substituída por pastagem ou por agricultura. Em cada caso, foram simulados cenários com percentuais de área desmatada de 20%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100%. Os cenários com desmatamento

inferiores a 40% são de Soares Filho et al. (2003), enquanto os demais (desmatamento maiores que 40%) foram obtidos com a mesma metodologia, por Sampaio (2007), apenas avançando-se mais a simulação de desmatamento, abrangendo somente a porção oeste da Amazônia em razão da previsibilidade do clima pelo modelo. Assim, especificamente para a região oeste da Amazônia (onde se espera mudanças mais intensas) os resultados mostram aumento na temperatura e redução na evapotranspiração e na precipitação, especialmente na estação seca. Destacam, ainda, que a redução na precipitação na área é mais evidente quando o desmatamento excede 40% da extensão original da floresta.

Sampaio et al. (2007) explicam que o mecanismo subjacente à mudança na precipitação está ligado à redução da evapotranspiração associada com o aumento do albedo, o decréscimo no índice de área de folhagem, na profundidade das raízes e a redução na rugosidade do terreno, fatores que levam a um decréscimo no fluxo de calor latente da superfície. Assim, pela redução da evapotranspiração, a eliminação da floresta diminui a quantidade de água “bombeada” para a atmosfera, dessa forma contribuindo para redução na precipitação. Concluem, ainda, que a redução na precipitação pode criar condições favoráveis para alteração da estrutura da floresta, levando a um processo de savanização.

De modo geral, portanto, os estudos concluem que o desmatamento em larga-escala pode, de fato, provocar efeitos sobre o clima, mais especificamente sobre a precipitação e vazão, em virtude do surgimento de interações atmosféricas. Os autores explicam essa redução em razão do maior albedo, menor profundidade das raízes, menor rugosidade e menor índice de área de folhagem, fatores que levam à diminuição do calor latente, causando redução significativa na evapotranspiração e decréscimo no fornecimento de água para a atmosfera (NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991; COSTA; FOLEY, 2000; SAMPAIO et al., 2007).

Deve-se observar, entretanto, que as conclusões apresentadas têm origens, fundamentalmente, de simulações de cenários futuros, utilizando modelos de circulação atmosférica nos quais condições de mudança de cobertura vegetal são hipotéticas, controladas e alteradas pelos autores, ou seja, tais resultados são tidos como “possibilidades/ameaças para o futuro” e não como “realidades do presente”.

## 2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE DINAMICA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA AMAZÔNIA LEGAL

O desmatamento na Amazônia Legal reduziu mais de 70% desde 2004, quando alcançou o segundo pico mais alto da história do monitoramento do bioma (27.772km<sup>2</sup>). Naquele ano, o Governo Federal adotou várias medidas para controlar o problema (NEPSTAD et al. 2014). Entre as principais medidas está o Cadastro Ambiental Rural (CAR), o Programa Municípios Verdes e o crédito rural, somente para aqueles que estão em acordo com as leis ambientais entre outras. Essas medidas assumidas desde então auxiliaram a reduzir o desmatamento na região.

O bom resultado levou o Brasil em 2012 a propor uma meta de 80% de redução da supressão vegetal em relação à média registrada entre 1996 e 2004 (27.772km<sup>2</sup>) em seu Plano Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC). Na prática, o país terá de chegar em 2020 com aproximadamente 3.925 km<sup>2</sup> de desmatamento anual, um caminho na direção do anseio da sociedade em zerar o desmatamento na Amazônia, compreendendo um importante passo para a estabilização climática, sem comprometer o desenvolvimento econômico e social da região.

Contudo, de 2009 a 2015 o desmatamento manteve-se estagnado em um patamar médio de 6.080 km<sup>2</sup>. Em 2012 ainda se obteve a taxa mais baixa registrada nos últimos 20 anos na Amazônia (4.571 km<sup>2</sup>), mas após esse ano tivemos sucessivos aumentos e pequenos recuos. Tal dinâmica já indicava que o esforço de redução para taxas ainda menores, como estabelecido no PNMC, seria maior e mais desafiador. Nos últimos dois anos, as taxas registradas pelo INPE aumentaram, chegando em 2016 a 7.989 km<sup>2</sup>, a maior desde 2008. Isso significa que se desmatou o equivalente a 128 campos de futebol por hora em 2016.

Geist; Lambin (2001, 2002) estudaram as causas do desmatamento e mostraram que estão associados aos usos e ocupação do solo, relacionando às causas diretas do desmatamento em três categorias: expansão das pastagens e áreas agrícolas, extração de madeira e, expansão da infraestrutura urbana.

### 2.2.1 A Pecuária

A questão da pecuária na Amazônia, como um todo tem sido discutida ao longo dos anos, mas para entender de fato como ela tem contribuído para as possíveis alterações do uso e ocupação do solo, apresenta-se um suporte histórico com pontos de vistas distintos sobre o tema.

Em meados da década de 1970, a pecuária na região amazônica era apontada como predatória e somente considerada economicamente viável, em virtude do baixo preço da terra, subsidiada pela extinta Superintendência para o Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e pela extração da madeira, a qual promovia recursos financeiros para pagar o custo da terra (TEIXEIRA, 1998).

Esta visão pessimista de que a pecuária não possuía desempenho financeiro satisfatório com uso de tecnologia tradicional, de que só seria lucrativa se houvesse incentivos fiscais, ganhos especulativos com a terra ou uma favorável relação gado/insumos perdurou até meados da década de 1980 (SCHNEIDER et al., 2000). Contrapondo essa visão pessimista a respeito da pecuária, Margulis (2003) apresenta argumentos sobre a rentabilidade da pecuária, afirmando que a visão tradicional em torno da lucratividade da atividade na Amazônia é extremamente pessimista, baseando-se, principalmente na incrível expansão dessa atividade na região desde a década de 1970. Para esse autor, a criação de gado na região amazônica se mostra rentável e segura, principalmente, porque:

- a) o gado é o meio encontrado para garantir a posse da terra;
- b) comparando a pecuária à agricultura, principalmente as culturas temporárias, o risco da atividade é baixíssimo em termos de mercado, de comercialização, de preço dos produtos, das condições climáticas e de pragas;
- c) o gado é uma forma de capital líquido, facilmente transacionável;
- d) o transporte do gado, da carne ou do leite, é relativamente simples;
- e) a atividade possui baixíssima demanda por mão-de-obra e;
- f) no caso dos pequenos pecuaristas, existem benefícios indiretos, como a tração, a adubação, além do possível fornecimento de bezerros para os grandes produtores.

Um fato que corrobora a visão apresentada por Margulis (2003), está relacionado aos incrementos tecnológicos, embora ainda pequeno quando comparados com o resto do país e a diminuição dos incentivos fiscais destinados à pecuária nos últimos anos. As adaptações tecnológicas, gerenciais e as condições geoecológicas em áreas de pastagens consolidadas na

Amazônia Oriental têm permitido o aumento da produtividade e a redução de custos (BRASIL, 2004).

Margulis (2003), faz uma análise explicativa demonstrando que no período de 1990 a 1995 o crédito subsidiado, que teoricamente estava ligado a expansão da pecuária (e dos desmatamentos), foi removido e os incentivos fiscais da SUDAM reduzidos, entretanto, ainda assim as taxas de desmatamento não diminuíram. Os incentivos fiscais e o crédito rural tiveram um papel importante no passado para construir a infraestrutura e a base industrial associadas à produção da pecuária (MARGULIS, 2003). Na atualidade, há um maior controle sobre a alocação dos recursos, principalmente porque a liberação do crédito rural está intimamente ligado a regularização ambiental, tais como o Cadastro Ambiental Rural (CAR), Licença Ambiental Rural (LAR) e o próprio licenciamento ambiental. Os incentivos fiscais não têm papel tão relevante como fator explicativo da lucratividade produtiva e, portanto, dos desmatamentos na Amazônia.

A criação extensiva de gado no Brasil, embora seja uma atividade com histórica importância econômica e social, causa efeitos negativos, como a destruição de florestas nativas, degradação do solo, poluição dos recursos hídricos e emissão de gases do efeito estufa (GEEs) (DE ZEN et al., 2008). A bovinocultura na Amazônia Legal apresentou aumento de 116% (com base nos dados do IBGE) entre os anos de 1995 e 2013. O número de bovinos registrados na Amazônia Legal em 2013 foi de 80,3 milhões, representando 37,9% do rebanho no território nacional. A análise das criações de animais entre 1995 e 2013 indicou crescimento de 52,45%, sendo que as criações de bovinos, equinos, ovinos e aves apresentaram crescimento positivo. Os demais tipos de criações animais tiveram crescimento negativo, conforme pode ser visto na Tabela 1 (FGV, 2016).

Tabela 1 - Distribuição das criações de animais (milhões de cabeças) e variação percentual entre 1995 e 2013 na Amazônia Legal.

	<b>1995</b>	<b>2006</b>	<b>2013</b>	Varição percentual entre 1995 e 2013
Bovinos	37,16	73,35	80,29	116%
Equinos	1,08	1,14	1,21	13%
Suínos	7,72	4,65	3,91	-49%
Búfalos	1,19	0,81	0,98	-18%
Caprinos	0,64	0,44	0,35	-45%
Ovinos	0,60	1,03	1,09	82%
Aves	59,08	60,33	76,02	29%

Fonte: adaptado de FGV (2016)

O principal estado criador de animais no ano de 2013 foi o Mato Grosso, com 30 milhões de animais, representando 35% da criação em toda a Amazônia Legal. O rebanho bovino na Amazônia Legal encontra-se em expansão e com maior participação no rebanho nacional, sendo que o rebanho de bovinos na Amazônia Legal representava 14% do rebanho nacional, em 1988, e 38%, em 2011. Se, de um lado, tem-se um aumento do número de animais e representatividade do rebanho nacional, por outro, temos uma redução da taxa de desmatamento, isso pode ser visto na Figura 3.

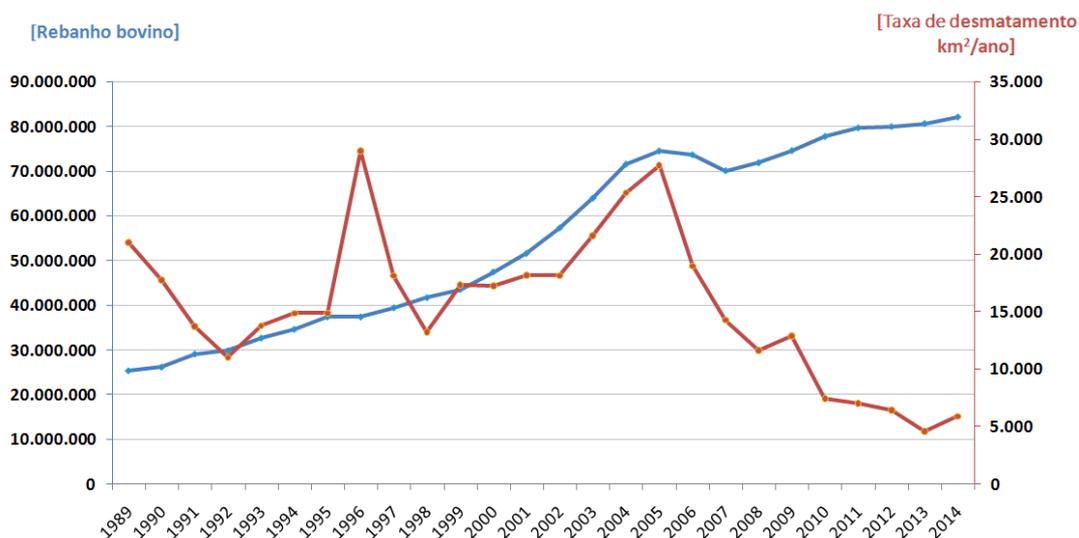


Figura 3 - Análise da evolução do rebanho bovino (linha azul) e taxa de desmatamento (linha vermelha) na Amazônia Legal entre 1989 e 2014

Fonte: adaptado de FGV (2016).

Tal observação entra em conflito com as afirmações de De Zen et al. (2008), uma vez que o crescimento do rebanho bovino é devido à intensificação tecnológica, com possível redução da destruição de ecossistemas nativos, degradação do solo, poluição dos recursos hídricos e emissão de gases do efeito estufa (FGV, 2016).

## 2.2.2 Agricultura na Amazônia Legal

A importância crescente da atividade agrícola no Brasil, principalmente a sojicultura tem fornecido justificativa política para investimentos governamentais em infraestrutura, tais como hidrovias, ferrovias e rodovias para o transporte da soja e dos insumos exigidos por esta atividade (FEARNSIDE, 1999).

No caso específico de Santarém, pode-se destacar como infraestrutura de transporte a hidrovia Teles Pires-Tapajós, a rodovia Cuiabá-Santarém e o porto da Cargill. A

pavimentação da rodovia Santarém-Cuiabá, obra incluída no programa do Governo Federal denominado “Avança Brasil”, também tinha como principal motivação o escoamento de soja. Fearnside (2005) expõe que a pressão política pela pavimentação daquela rodovia era liderada por Blairo Maggi, atualmente ministro da agricultura do governo Temer, do Grupo Maggi, o qual estava financiando as plantações de soja na região e apoiando politicamente a construção do terminal portuário da Cargill, em Santarém.

A hidrovía Teles Pires-Tapajós destinar-se-ia fundamentalmente ao transporte de soja. Porém, a obra foi suspensa em 1997 em decorrência de falhas no seu Estudo de Impactos Ambientais, especificamente no que concernia a impactos relacionados às tribos indígenas existentes na área.

Fearnside (2003) considerou que o custo de produção da soja inclui não apenas o dinheiro investido em infraestrutura e no sistema de produção da soja, mas também o custo de oportunidade referente à perda de serviços ambientais causada pelo impacto total nos ecossistemas naturais afetados pelo ‘efeito arraste’<sup>2</sup>, e não somente o que é introduzido diretamente pelas plantações de soja.

O avanço das plantações de soja na Amazônia Legal atua de forma catalítica no processo de desmatamento. Se por um lado, a expansão da área cultivada pressiona a floresta, por outro os investimentos em infraestrutura alimentam a cadeia produtiva da soja gerando um círculo de destruição (FEARNSIDE, 1999).

A soja é o principal grão brasileiro, tornando o Brasil, o segundo maior exportador mundial (USDA, 2017). Entre 1990 e 2000, a produção mundial de soja teve um incremento de 64 milhões de toneladas, com uma tendência crescente de expansão. No mesmo período, a produção brasileira de soja elevou-se em 247%, enquanto a área plantada aumentou 119% (SOUZA; PEROBELLI, 2008).

Na Amazônia Legal do período entre 1990 e 2013, segundo os dados do IBGE, a taxa acumulada do crescimento nesse período da área colhida foi de 227% (Figura 4).

---

<sup>2</sup> Efeito Arraste consiste, basicamente, na atração de outras atividades/investimentos para a região, em virtude da infraestrutura implantada, as quais, muitas vezes, geram impactos ambientais negativos. Dentre estas outras atividades, costumam estar incluídas, por exemplo, a pecuária e a extração madeireira, ambas potencialmente danosas à biodiversidade (ARAUJO, 2010).

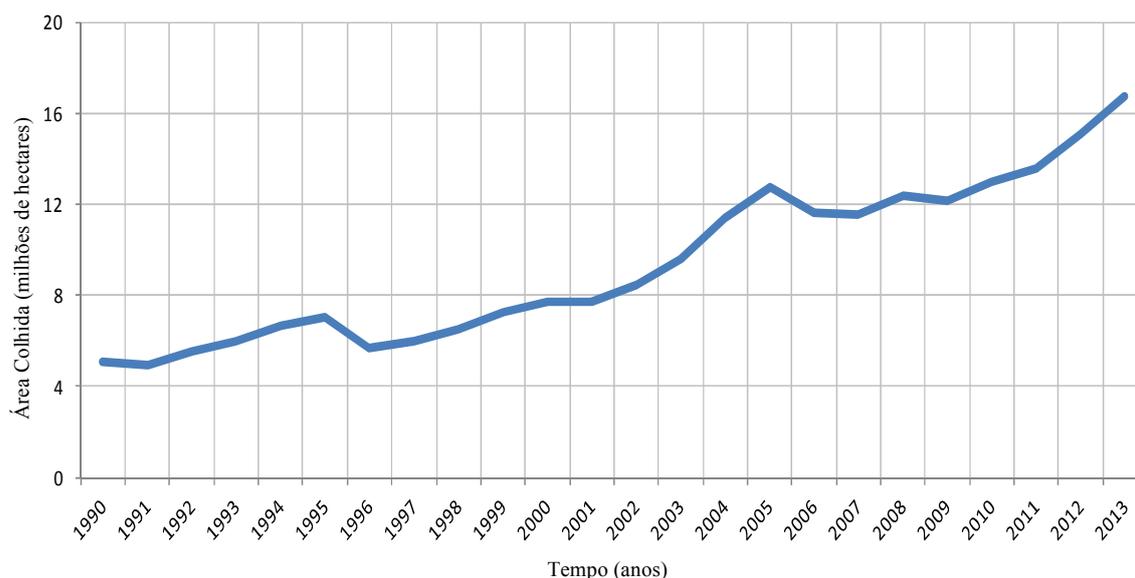


Figura 4 - Evolução da área colhida (milhões de hectares) de lavouras temporárias na Amazônia Legal, entre 1990 e 2013

Fonte: adaptado de IBGE (2015)

Nos municípios da Amazônia Legal brasileira para ano de 2013, a área colhida de lavouras temporárias foi de 16,7 milhões de hectares, valor que corresponde a 26% da área total colhida com lavouras temporárias no Brasil (FGV, 2016).

A soja é o produto com maior extensão de área destinada à lavoura 9,3 milhões de ha (foram 27,5 milhões de toneladas produzidas, 33% da produção nacional), representando 55,9% da área total colhida com lavouras temporárias na Amazônia Legal, seguida do milho (4,4 milhões ha), arroz (0,78 milhões ha), mandioca (0,66 milhão ha) e algodão (0,75 milhão ha) (FGV, 2016). Entre 1990 e 2013 a soja teve um aumento de 492% na área colhida, passando de 1,5 milhão de hectares, em 1990, para 9,3 milhões de hectares, em 2013. A produtividade da soja cresceu 49%, passando de uma produção, em 1990, de 1,98 tonelada/hectare para, em 2013, uma produção de 2,95 toneladas/hectare (FGV, 2016). Os municípios da Amazônia Legal nos estados do Mato Grosso, do Maranhão e do Tocantins no ano de 2013, foram os que mais cresceram em área colhida com lavouras temporárias, somando 14 milhões de hectares e representando 88% da área total colhida na Amazônia Legal em 2013 (FGV, 2016).

O aumento na expansão da cultura da soja, segundo Alencar et al. (2004) e Nepstad et al. (2006) se justifica devido a alguns fatores relacionados ao mal da vaca louca, uma vez que a União Europeia baniu rações baseadas em proteína animal, substituindo-a, principalmente, por soja, tornando-se, desse modo, o mais importante dentre os novos mercados para a soja

produzida na Amazônia. Também, o crescimento econômico da China provocou um aumento da classe média (consumidora de carne animal alimentada à base de soja), fazendo com que a demanda internacional por soja “crescesse”.

Fearnside (2005) diz que a soja responde às ‘forças do mercado global’<sup>3</sup> que vêm se expandindo rapidamente. O mercado global de soja engloba a soja em si, o óleo de soja e o farelo de soja, sendo a Ásia o principal mercado deste último, utilizando-o como ração. A China, que até 1993 exportava soja, é hoje a maior importadora do mundo (nas três formas) e o comportamento futuro daquele mercado será um fator determinante na expansão da sojicultura no Brasil.

Nepstad et al. (2006) consideram que a expansão da agroindústria de soja na Amazônia deve ter ocasionado, indiretamente, a expansão do rebanho de gado na Amazônia, uma vez que muitos fazendeiros, proprietários de terras, apropriadas para a produção de soja venderam suas áreas, com enormes ganhos, o que os permitiu ampliarem seus rebanhos e comprarem novas terras mais ao norte, em regiões onde o preço da terra é menor.

Existem grupos que defendem a expansão da sojicultura na região, tendo como argumento principal o crescimento econômico, representado em dados como a participação do setor na pauta de exportações. Assim, por exemplo, pode-se citar que o “complexo soja” foi, de acordo com a EMBRAPA (2005), o principal produto de exportação do agronegócio brasileiro em 2004, e continua sendo até os dias atuais, logo é uma atividade importantíssima do ponto de vista econômico e que por isso mesmo desperta interesse geral. Outro argumento levantado a favor do agronegócio da soja é que, teoricamente, a mesma é produzida em rotação com pastagens. Frequentemente, os produtores de soja enfatizam que para a sua expansão não é necessário desmatar a floresta. De acordo com este grupo, a soja iria ocupar áreas de florestas já desmatadas anteriormente pela pecuária (ABIOVE, 2005).

Por esse ponto de vista, a soja seria então uma espécie de “salvação” para essas áreas já degradadas, ajudando na recuperação das mesmas e, acima de tudo, dando-lhes uma utilização de alto retorno econômico. Os produtores de soja enfatizam, então, que para a expansão da soja não seria necessário desmatar a floresta e apresentam dados demonstrando a pequena parcela que ocupa no bioma Amazônico, o que os conduz à conclusão de que não se trataria de um importante vetor do desmatamento (ABIOVE, 2005). Também argumentam

---

<sup>3</sup> Forças do mercado global: são as forças de oferta e demanda que fazem os mercados funcionarem. A microeconomia moderna lida com a oferta, demanda e o equilíbrio do mercado. As forças de oferta e demanda são resultado do comportamento das pessoas quando elas interagem dentro de mercados (VASCONCELLOS, 2009).

que poucas vezes os sojicultores derrubam eles próprios a floresta, ao invés disso, costumam comprar áreas já desmatadas (FEARNSIDE, 2005).

Entretanto, diversos trabalhos consideram que a avaliação da influência da cultura sobre o desmatamento não é tão trivial. Segundo Alencar et al (2004), o cultivo de grãos estava começando a pressionar as áreas de floresta. Os autores consideravam ainda que no caso da soja essa influência sobre o desmatamento ainda se dava de forma indireta, pois a expansão da cultura acontecia fundamentalmente em áreas de pastagens, até mesmo pelo custo de implantação da atividade se tornar menor. Alencar et al. (2004) afirmam que, no entanto, ao ocupar pastagens, a soja acaba por pressionar a expansão da atividade pecuária para áreas com florestas, fomentando novos desmatamentos. Carvalho (1999) e Homma; Carvalho (1997) apontam para uma tendência de que os pequenos produtores expulsos de suas terras encontrem como única alternativa de sobrevivência o desbravamento de novas áreas de floresta virgem. Esse argumento é corroborado por trabalho do USDA (2004), que acrescenta ainda que o mesmo raciocínio se aplica aos fazendeiros que tenham suas antigas áreas de pastagens ocupadas pelo avanço da soja.

Carvalho (1999) corroborado por Fearnside (2001), considera a soja uma força nova e poderosa dentre as ameaças à biodiversidade brasileira, concluiu que estratégias efetivas para conter o avanço e os danos causados pela soja requerem entendimento dos processos pelos quais o avanço ocorre e a natureza de seus impactos. Os tomadores de decisão e o público em geral precisam estar cientes de toda gama de impactos e dos meios, muitas vezes indiretos, pelos quais são infligidos.

Segundo Fearnside (2001), até o ano 2000, a preocupação ambiental de que a floresta tropical não fosse desmatada fez com que a maior parte das plantações de soja avançassem em áreas fora das florestas tropicais, tais como o cerrado (Centro-Oeste) e os campos (Amazônia). Entretanto, pode-se contestar a afirmação de que a preocupação com o desmatamento tenha sido fator determinante para o maior avanço em áreas fora das florestas tropicais, pois há dois fatores bem mais relevantes do ponto de vista dos empresários do agronegócio: a maior produtividade e a melhor adequabilidade natural das áreas de cerrado. De toda forma, o autor considera que, ainda assim, os impactos provocados por tal monocultura são significativos, uma vez que se reconhece que o cerrado brasileiro constituiria a vegetação do tipo savana com maior diversidade de espécies no mundo. Mais susceptível ainda é a faixa de transição entre cerrado e floresta, onde a concentração de espécies endêmicas é maior que no cerrado ou na floresta. Bickel (2004) destaca ainda, que cerca da metade da área potencial para expansão da soja no Brasil, 50 dos 100 milhões, é considerada

vegetação secundária, exemplo disso é que na região de Santarém foram aproveitadas, inclusive, áreas de floresta secundária, de capoeira alta, abandonadas há 30 ou 40 anos, para a implantação de novas áreas de soja, entre o final de 2001 e durante 2002. Sendo que estas matas secundárias já cumpriam de 80 a 85% do papel de uma floresta madura, ou seja, poderiam ser consideradas praticamente regeneradas (ALENCAR, 2004). Dessa forma, desmatá-las novamente teria impacto similar ao desmatamento de uma vegetação primária, no que diz respeito ao clima, à biodiversidade, às águas e a outros aspectos ambientais.

Pelo exposto até aqui, a implantação da agricultura nos moldes atuais, na Amazônia Legal, que não atenda às técnicas adequadas de manejo do solo, constituem exemplos de atividades que vêm sendo conduzidas pela lógica do crescimento econômico, atreladas a destruição dos recursos ambientais.

Segundo McGrath; Vera-Diaz (2006), a Amazônia enfrenta uma ameaça em potencial: a expansão da soja e, de forma geral, da agroindústria. Durante décadas, cientistas e ambientalistas asseguraram que os solos amazônicos não tinham condições de sustentar o cultivo contínuo, muito menos sistemas intensivos que utilizassem máquinas pesadas e insumos químicos, como a sojicultura. Para muitos, a expansão da soja na Amazônia resultará numa catástrofe ecológica sem precedentes, acelerando a perda de floresta, a extinção da biodiversidade, a erosão do solo, a poluição das águas, o assoreamento dos rios e as mudanças climáticas, comprometendo definitivamente o equilíbrio ecológico regional. Outros, no entanto, argumentam que houve bastante confusão sobre o potencial agrônomo dos solos da Amazônia.

Embora existam ameaças para o meio ambiente, também há mecanismos para mitigar os impactos provocados pela expansão da cultura. Além disso, tais impactos devem ser avaliados no contexto das alternativas reais de uso do solo, como a exploração madeireira, a pecuária extensiva e a agricultura de corte e queima. Quando comparada a esses sistemas, fica evidente que a soja constitui num perigo adicional para a floresta, porém não é a principal ameaça ao equilíbrio ecológico da região.

A conversão das florestas em pastos, campos de soja, agricultura ou mesmo a extração madeireira tem sérios custos sociais e ambientais, entre os custos ambientais temos: a mudança nos parâmetros do ciclo hidrológico e no balanço hídrico local ou regional, que é foco principal deste estudo; pode-se citar ainda os efeitos nocivos dos agrotóxicos no meio-ambiente e na saúde humana; a expulsão das comunidades nativas de sua terra e a erosão do solo com conseqüente assoreamento de mananciais. Seus danos são diversos, complexos, ocorrendo problemas em efeito dominó (o desmatamento, erosão, assoreamento etc.) e em

grande parte, possivelmente irreversíveis. A perda de biodiversidade tão rica pode representar a eliminação de recursos com uso potencial futuro sequer conhecidos nos dias de hoje. Constitui-se, então, em uma situação em que seria difícil a monetarização dos mesmos como uma tentativa de repará-los simplesmente pela internalização nos custos e preços.

### 2.3 O MODELO HIDROLÓGICO DE *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* (SWAT)

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre (MAIDMENT, 1993). A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, reunindo as superfícies que captam e despejam água sobre um ou mais canais de escoamento que desemborcam numa única saída. A bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia.

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) dos Estados Unidos e possui a capacidade de realizar modelagem hidrológica em bacias hidrográficas de grande escala, realizando análises em diferentes cenários de uso e ocupação do solo com a predição dos impactos sobre a qualidade da água, do transporte de sedimentos e do transporte de produtos químicos agrícolas (BALDISSERA, 2005).

O SWAT é um modelo matemático de parâmetros ‘distribuído e contínuo’<sup>4</sup> que permitem um número de diferentes processos físicos a serem simulados em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os impactos das alterações do uso do solo sobre o escoamento superficial, subterrâneo, na produção de sedimentos e na qualidade das águas nas bacias hidrográficas (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). É largamente utilizado na prevenção e no controle da erosão dos solos, controle da poluição difusa e gestão ambiental de bacias hidrográficas rurais (NEITSCH et al., 2005).

A aplicação do modelo requer a entrada dos dados na forma especializada com o auxílio de um sistema de informações geográficas (SIG). A ferramenta do SIG possibilita a subdivisão da bacia hidrográfica em áreas homogêneas (sub-bacias). Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units – URH’s*), conforme o relevo, tipo de solos e uso e ocupação do

---

<sup>4</sup> Pode-se definir modelos distribuídos e contínuos aqueles que simulam os processos sequencias dentro do sistema físico, num intervalo de tempo, e fornece séries temporais de saída do modelo (TIM, 1996).

solo.

Na simulação da sub-bacia, o ciclo hidrológico é calculado com base na equação de balanço hídrico (NEITSCH, 2005):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

Em que:

$SW_t$ : quantidade final de água no solo (mm);

$SW_0$ : quantidade inicial de água no solo no dia i (mm);

t: tempo (dias);

$R_d$ : precipitação no dia i (mm);

$Q_{sup}$ : escoamento; superficial no dia i (mm);

$E_a$ : evapotranspiração no dia i (mm);

$W_{seep}$ : percolação no dia i (mm);

$Q_{gw}$ : fluxo de retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

São simulados os seguintes processos hidrológicos: interceptação, infiltração, redistribuição da água no solo, evapotranspiração, escoamentos sub-superficial e superficial, armazenamento, escoamento em canais principais, tributários e vazão.

O escoamento superficial pode ser calculado por meio de uma modificação do método do *Soil Conservation Service* (SCS) ou pelo método de infiltração de Green; Ampt.

A produção de sedimento é computada para cada sub-bacia com a *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE):

$$Sed = 11,8(Q_{sup} q_p area_{hru})^{0,56} K.C.P.LS.CRFG \quad (5)$$

Em que:

Sed: produção de sedimento (mg);

$Q_{sup}$ : escoamento de superfície ( $m^3$ );

$q_p$ : taxa de escoamento de pico ( $m^3 s^{-1}$ );

$area_{URH}$ : área da URH (ha);

K: fator de erodibilidade do solo;

C: fator de uso e manejo do solo;

P: fator de práticas conservacionistas;

LS: fator topográfico;

CFRG: fator de fragmento grosseiro.

Segundo Machado (2002), na modelagem hidrológica houve o desenvolvimento de técnicas em direção à automatização para determinar as propriedades da drenagem em bacias hidrográficas, fazendo com que a representação cartográfica usual do relevo fosse substituída gradualmente por ‘Modelos Numéricos do Terreno’<sup>5</sup> (MNT’s), o que facilitou e muito a tarefa de preparação desses dados. Desta forma, um importante aspecto na modelagem espacial distribuída é decidir o delineamento das sub-bacias e a extração da rede de drenagem a partir dos MNT’s.

O SWAT permite a integração com sistemas de informações geográficas (SIG’s), assim como outros modelos (TOPMODEL, SHE, SMoRMod, WEPP etc). Com isso foi desenvolvida a interface ArcSWAT que funciona como uma extensão do *Arcview*<sup>6</sup> e permite a utilização de suas ferramentas de geoprocessamento como suporte às etapas de modelagem, isso facilita e torna mais intuitiva a alimentação com os dados de entrada do modelo (JUNIOR, 2014).

Uma das primeiras etapas da modelagem no SWAT é a delimitação da bacia e das sub-bacias, estas são geradas a partir dos modelos digitais de terreno (MDT) da área de estudo ou por meio de uma bacia anteriormente vetorizada com as sub-bacias. A partir daí, o modelo executa novas delimitações espaciais dentro das sub-bacias, chamadas Unidades de Resposta Hidrológica (URH), as quais são geradas através da sobreposição dos mapas de tipo de solo, uso e ocupação do solo e do modelo digital de elevação (Figura 5). Em cada URH gerada é atribuída apenas uma classe pedológica e um uso e ocupação do solo, representando assim, discretizações do espaço interno das sub-bacias. Então, as URHs são utilizadas como unidades para os cálculos realizados pelo modelo e a finalidade desta subdivisão é justificada pelo ganho de tempo no processamento do SWAT nas áreas com características físicas iguais, nas quais a resposta hidrológica é a mesma (NEITSCH et al., 2005).

---

<sup>5</sup> O MNT pode ser definido com a representação matemática de uma superfície ou feição altimétrica através das coordenadas X, Y e Z.

<sup>6</sup> ArcView é um software GIS rico em funcionalidades para visualização, gerenciamento, elaboração e análises de dados geográficos. Com o ArcView é possível entender o contexto geográfico de seus dados, bem como relacionamentos e identificar padrões de distribuição espacial. ArcView é o nível de entrada de licenciamento básico do ArcGIS Desktop, um software de informação geográfica, um sistema produzido pela ESRI.

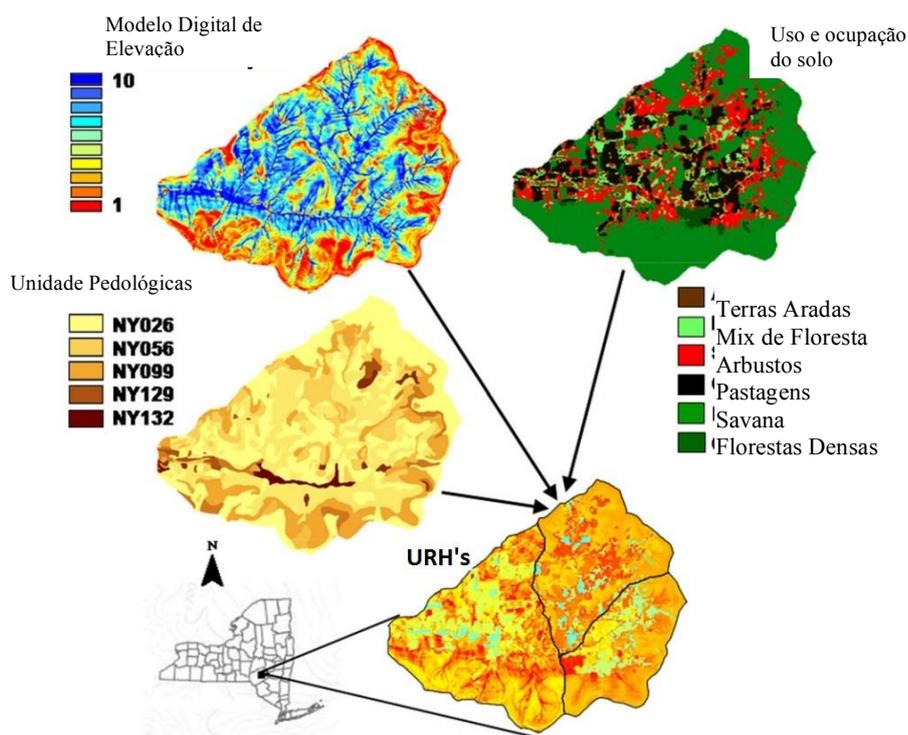


Figura 5 - Composição das unidades de resposta hidrológica (URH) a partir dos mapas das unidades pedológicas: os usos, ocupação do solo e a topografia  
 Fonte: Easton et al. (2008)

O SWAT é baseado em uma estrutura de comandos que propagam o escoamento, o transporte de sedimentos e de químicos agrícolas através da bacia. O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração. O modelo requer dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar e umidade relativa (DURAES, 2010). Estes dados diários que alimentam o SWAT compõem as forçantes do modelo, variando durante o período estudado. Já os dados de tipo e uso do solo, assim como o modelo digital de elevação, são estáticos durante a modelagem, mantendo um mesmo valor durante toda a análise.

Independente da natureza do estudo realizado com o SWAT, seu funcionamento será sempre uma função do balanço hídrico existente na bacia hidrográfica. Assim, o processamento do modelo SWAT pode ser resumido nas seguintes etapas: num primeiro momento são calculados os fluxos para cada URH, depois os resultados de cada URH são agregados por sub-bacia, por fim, as respostas para cada sub-bacia são direcionadas para a rede de drenagem existente na bacia hidrográfica (SALLES, 2012; NEITSCH et al., 2005).

Após a simulação inicial segue-se a calibração que é um procedimento de ajuste dos

parâmetros de um modelo à realidade da região em estudo, ou seja, visando encontrar os parâmetros que permitam ao modelo representar a bacia hidrográfica de forma adequada, coerente com a realidade observada (SOUZA, 2015).

A calibração de modelos hidrológicos tem início, geralmente, realizando-se a análise de sensibilidade dos parâmetros, em que são identificados os parâmetros que mais influenciam na modelagem, e em seguida, se inicia a calibração desses parâmetros, podendo ser conduzida tanto de forma automática, utilizando algoritmos de otimização, quanto de forma manual (SALLES, 2012).

Já o procedimento que mede o quão bem o ajustamento dos parâmetros realizado na calibração fornece dados coerentes com a realidade denomina-se validação do modelo. Ela é a garantia de qualidade dos resultados obtidos por modelos, uma vez que se comparam as respostas modeladas com os valores observados (SOUZA, 2015).

### **2.3.1 Aplicações do Modelo SWAT no Brasil**

As proporções continentais do Brasil fornecem a grande variabilidade climática entre diversas regiões do país, e também a existência de diferentes biomas, tendo a necessidade de um conjunto de ferramentas no auxílio a tomada de decisões referentes ao manejo dos recursos naturais. Neste aspecto, a modelagem de bacias hidrográficas aparece como uma poderosa ferramenta de gestão de recursos hídricos e o SWAT, como um dos modelos mais consistentes e utilizados ao redor do mundo (BRESSIANI et al., 2015).

Ainda segundo Bressiani (2015), a utilização do SWAT no Brasil teve um grande crescimento na última década, com trabalhos que buscaram verificar desde a capacidade do modelo de representar satisfatoriamente as bacias hidrográficas brasileiras, até análises mais complexas, como a avaliação do impacto causado em bacias (alteração do volume de água escoado superficialmente, transporte de sedimentos e aditivos agrícolas) pela mudança do uso do solo ou pelo desmatamento de florestas.

Serão apresentados a seguir diversos trabalhos desenvolvidos com SWAT no Brasil, com um resumo dos resultados e possíveis problemas encontrados pelos autores:

Oliveira (1999), com o intuito de avaliar as alterações nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do Rio Jones na Bahia utilizou o modelo SWAT, os resultados obtidos, permitiram avaliar de forma quantitativa os efeitos da alteração no uso do solo devido a substituição da vegetação nativa por outras de coberturas diversas, bem como os efeitos da urbanização e construção de barragem na bacia hidrográfica e as

consequências da alteração na zona costeira.

Machado; Vettorazzi (2003) usaram o modelo SWAT para simular a carga de sedimentos gerada pela bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, em Piracicaba (SP), no biênio 1999/2000. Os resultados desta simulação da produção de sedimentos foram confrontados com os dados observados em um posto hidrossedimentométrico, localizado no terço superior da microbacia, utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) e o desvio dos dados simulados em relação aos observados (Dv). Para as condições específicas da microbacia do Ribeirão dos Marins, os resultados obtidos na simulação da produção de sedimentos pelo modelo, após a calibração, foram de 0,83, para o COE e de -3,2 %, para o Dv, indicando um bom ajuste dos dados simulados comparados aos dados observados.

Barsanti et al. (2003) avaliaram a erosão do solo em duas bacias na área do Pantanal/MS, uma de grande e outra de pequena escala, com cenários de uso do solo para 30 anos alterando a vegetação nativa por agricultura e pastagem. O uso do modelo SWAT resultou em ótimas estimativas para a escolha correta da prática de manejo e do uso de solo.

Baltokoski et al. (2010) avaliaram a sensibilidade do modelo SWAT em prever a vazão e o fluxo total de fósforo em duas microbacias hidrográficas contíguas, dos rios Conrado (24,11 km) e Pinheiro (28.86 km), afluentes do rio Pato Branco, nos municípios de Pato Branco e Mariópolis – Paraná. O modelo foi alimentado com o MDE da região (composto a partir da carta topográfica Mariópolis MI – 2862/4, da Divisão de Serviços Geográficos do Exército), com mapa de uso e ocupação do solo obtido a partir de imagem de satélite *Landsat* TM5, bandas 3, 4 e 5 (de junho de 2000, com resolução espacial de 30 m), com mapa de tipos de solo obtidos de Machado (2006). Os dados climatológicos utilizados neste trabalho são provenientes da Estação Climatológica do Instituto Agrônomo do Paraná e do Sistema Meteorológico do Paraná para o município de Pato Branco, já as medidas de vazão foram obtidas através de duas estações fluviométricas da ANA, a jusante dos rios Conrado e Pinheiro (códigos da ANA 65925780 e 65925770, respectivamente). A pesquisa realizou uma análise de sensibilidade dos parâmetros para a calibração da vazão, chegando no seguinte ranking de parâmetros, em ordem decrescente de sensibilidade: 1) NPERCO - coef. de percolação de nitrogênio, 2) PPERCO – coef. de percolação de fósforo e 3) CH\_N – coef. de Manning para o canal principal, para as duas estações fluviométricas utilizadas na calibração. Na autocalibração para a estação do rio Conrado obteve-se um valor para o Coeficiente de Nash-Sutcliffe ou COE (coeficiente que mede a capacidade do modelo em bem representar a bacia, quanto mais próximo de 1, mais preciso é o modelo) de 0,68 e 0,70

para a estação do rio Pinheiro, sendo ambos resultados considerados satisfatórios de acordo com Silva et al. (2008). Já na análise de sensibilidade dos parâmetros para a calibração da exportação de fósforo total, obteve-se o seguinte ranking: 1) CN2 – curva número na condição de umidade média do solo, 2) SOL\_ORGP – concentração inicial de P orgânico no solo (mg/kg), 3) SLOPE – declividade média da sub-bacia (m/m). O procedimento de autocalibração para a exportação de fósforo total, não obteve um resultado adequado, portanto, foi necessária a calibração manual do modelo. Por fim, os autores concluíram que a análise de sensibilidade realizada facilitou, posteriormente, o procedimento de calibração do modelo. O modelo conseguiu bem representar a realidade da bacia quando alimentado com dados de frequência regular e quando a frequência de amostragem foi irregular e o número de dados pequeno, os procedimentos de análise de sensibilidade e autocalibração não foram eficientes na calibração do SWAT.

Pinto (2011) aplicou o modelo SWAT na simulação do escoamento, da produção e do transporte de sedimentos e da qualidade da água na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (com área de 6,88 km<sup>2</sup>), região da Serra da Mantiqueira – Minas Gerais. O modelo digital de elevação utilizado no SWAT foi gerado a partir de cartas topográficas vetoriais disponibilizadas pelo IBGE para o município de Bocaina de Minas (carta SF- 23-2-A- II-1). O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir de uma imagem de satélite IKONOS com resolução espacial de 5 m e levantamento em campo. Já o mapa de tipo de solos foi obtido do trabalho de Menezes (2007), que realizou o levantamento dos solos da região em estudo. Os dados climáticos foram obtidos no período de janeiro de 2006 a setembro de 2010 a partir de uma estação climatológica completa. Os dados de vazão foram determinados através de medições em campo para a determinação de uma curva chave, e então por meio de regressão, relacionando a vazão com a altura da lâmina d'água obteve-se toda a série de vazões para o período de janeiro de 2006 a setembro de 2010.

Na calibração da vazão, Pinto (2011) obteve um COE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe, que mede a precisão do modelo em representar a bacia) de 0,79 considerado bom e adequado por Gottschalk, Motovilov (2000). Já na simulação do transporte de sedimentos, nutrientes e da qualidade da água, obteve 0,65, 0,41 e 0,69, respectivamente, considerados aceitáveis por Silva et al. (2008).

Com o modelo calibrado e validado, Pinto (2011) realizou a simulação de alguns cenários, alterando o uso do solo, com a substituição de áreas de pastagem que ocorrem na região, por florestas de eucalipto, resultando na redução da produção e do transporte de sedimentos. Já a simulação que adotava a recomposição de matas ciliares ao longo de toda

rede de drenagem, evidenciou a redução da concentração de sedimentos na calha do ribeirão Lavrinha, demonstrando assim a possibilidade de uso do SWAT como uma poderosa ferramenta no gerenciamento de recursos hídricos.

Cruz (2012) realizou a calibração e validação da bacia hidrográfica do rio Siriri Vivo – Sergipe. Na alimentação do modelo utilizaram-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), os mapas de uso e ocupação do solo da região, obtidos de Sergipe (2004) e o mapa de tipo de solo. Os dados climatológicos foram obtidos a partir de quatro estações pluviométricas e uma estação agrometeorológica (localizadas nas proximidades do município de Siriri), em frequência diária de medição, para um período de 6 anos (de janeiro de 2000 a dezembro de 2005). Já as medições das vazões do rio foram realizadas através de um vertedouro retangular construído durante a realização da pesquisa. Na calibração do modelo, inicialmente foi realizada uma análise de sensibilidade e, posteriormente os valores dos parâmetros CN (curva número) e ALPHA-BF (constante de recessão do escoamento de base) foram modificados manualmente até que a vazão simulada pelo modelo se aproximasse da vazão mensurada. O autor pôde concluir que a produção de água e de sedimentos (este último, apenas de forma qualitativa) foi maior nas áreas onde o uso e a ocupação do solo se caracterizavam como agricultura, especificamente a cana-de-açúcar.

Souza (2015), realizou a calibração e validação do modelo de SWAT para a vazão e para o transporte de sedimentos, na bacia hidrográfica do rio Machadinho – Rondônia, com uma área de aproximadamente 5.485 km<sup>2</sup>. O MDE utilizado foi gerado através de imagens de satélite ASTER, do ano 2011, disponíveis no site da NASA. O mapa de uso e ocupação do solo também foi gerado a partir de imagens de satélite, LANDSAT 5, disponibilizadas pela organização americana USGS. Já o mapa de tipo de solo foi obtido do trabalho de Mercuri et al. (2009). Os dados climatológicos foram obtidos do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP), onde foram criadas estações virtuais para o aferimento dos dados da base de dados do GPCP, seguindo a mesma metodologia de Malutta (2012). A série histórica dos dados de vazão e descarga de sedimentos do rio Machadinho foram obtidas do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), para a estação com código 15575000.

Souza (2015) realizou uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros que tinham um maior impacto no modelo e em seguida, utilizou o programa SWAT-CUP para calibrar o modelo através do ajustamento dos 10 parâmetros mais sensíveis, determinados na etapa anterior. Para a calibração da vazão, obteve um COE de 0,80, considerado adequado por Gottschalk; Motovilov (2000). Nas simulações de cenários, Souza (2015) verificou um aumento da vazão quando da conversão da mata nativa em pastagem e em área urbana.

Tomando como base o exposto até aqui, a seguinte hipótese é considerada para esta tese, na bacia hidrográfica do Rio Tapajós, a diminuição das áreas de florestas primárias, gerada pelas diferentes classes de uso e ocupação do solo (pecuária, agricultura e extração de madeira) tem provocado modificações nas componentes do ciclo hidrológico, entre elas as vazões, com isso o processo de modelagem em SWAT podem gerar previsões dos valores das vazões, tornando-se assim ferramentas importantes na gestão dos recursos hídricos.

### **3 OBJETIVOS**

O objetivo principal desta tese é parametrizar e calibrar o modelo de SWAT na bacia do rio Tapajós, para que possa ser utilizado como ferramenta na gestão dos recursos hídricos e na previsão de impactos sobre a vazão em diferentes cenários alternativos.

São objetivos específicos: (i) o levantamento das bases de dados para simulações em SWAT para aplicações em modelagem de cenários; (ii) avaliar qual a melhor alternativa de origens de entrada para simulação do modelo, quanto a pedológicas (EMBRAPA e FAO) e climáticas (GPCP e INMET), com procedimentos de calibração e validação, utilizando índice de COE e porcentagem em BIAS como mensurador quantitativo; (iii) avaliar se a modelagem de SWAT, após procedimentos de parametrização e calibração é capaz de simular de modo satisfatório as vazões para o período de 01/01/2007 a 31/12/2008, considerando o uso do solo para o ano de 2007.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), a bacia hidrográfica do Rio Tapajós abrange três Estados: Pará, Mato Grosso e Amazonas. Situa-se entre os paralelos 02° e 15° de latitude sul e os meridianos 54° e 60° de longitude oeste. Sua extensão territorial ocupa uma área de aproximadamente 493.000 km<sup>2</sup>. A figura 6 ilustra a localização geral da bacia hidrográfica do Tapajós.

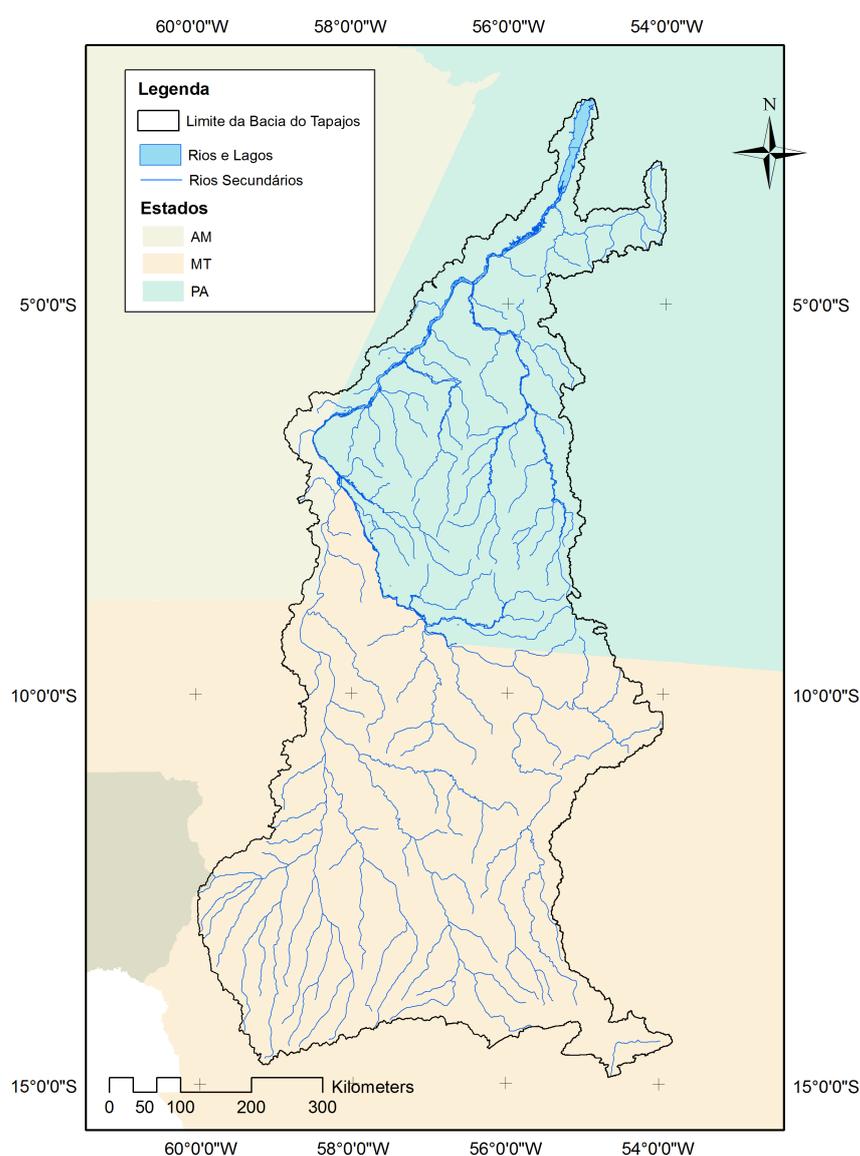


Figura 6 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Tapajós  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A bacia apresenta uma forma alongada, no sentido sul-norte, tendo como principais formadores os rios Jurema e o Teles Pires que, após se juntarem, próximo ao paralelo 7° 30' de latitude sul, passa a se denominar rio Tapajós. A área, objeto do presente estudo, compreende o trecho da bacia desde a confluência dos principais formadores do rio Tapajós até sua foz no rio Amazonas, junto à cidade de Santarém. Também neste trecho, a bacia apresenta forma alongada, no sentido sul-norte, estando quase integralmente inserida na porção ocidental do estado do Pará, próxima ao limite com o estado do Amazonas.

O rio Tapajós é um dos principais afluentes do rio Amazonas, corta a porção central da região, de Sul para Norte, numa extensão de aproximadamente 132 km, até desaguar no Amazonas, em frente à cidade de Santarém. No verão deixa à mostra quase 100 km de praias em ambas as margens, constituindo-se uma das maiores atrações turísticas do Pará. Em toda sua extensão dentro do município de Belterra, no estado do Pará, tem grande largura, chegando à 19 km defronte à comunidade do Aramanaí. As terras às margens do rio Tapajós são pouco férteis, pois há predominância de solo arenoso, tornando-as impróprias para atividades agropecuárias. Seu potencial madeireiro já está bastante explorado, mas em grande parte da bacia ainda predomina vegetação exuberante, composta por floresta densa de terra firme, na qual está inserida a Floresta Nacional do Tapajós, na margem direita do rio.

#### 4.2 DIAGRAMA DE SÍNTESE METODOLÓGICA

A execução deste trabalho foi inicialmente realizada com as etapas descritas no fluxograma descrito na figura 7.

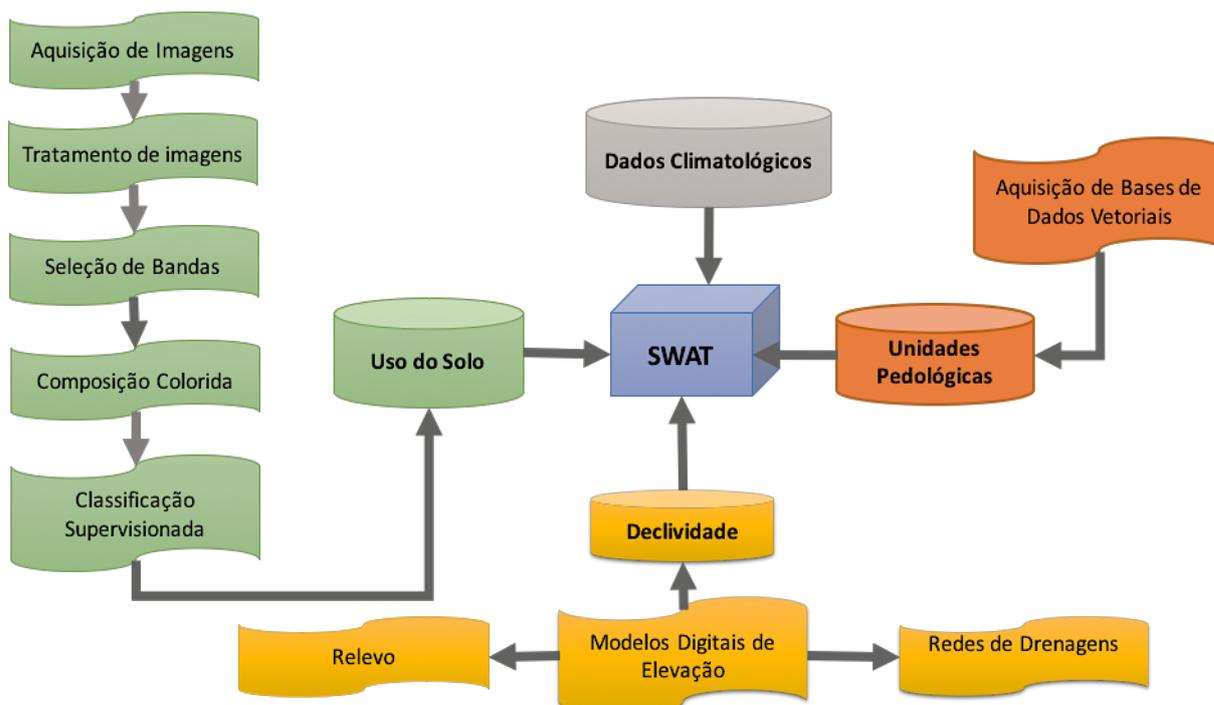


Figura 7 - Fluxograma de síntese do processo metodológico  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.2.1 Aquisição de Imagens

As imagens de satélite foram adquiridas no site da *U.S. Geological Survey* (USGS, 2016). Foram utilizadas 17 cenas da área de abrangência, compreendendo os períodos: janeiro de 2001 a dezembro de 2001 *landsat-7*, janeiro de 2007 a dezembro de 2007 *landsat-7*. O segmento destas imagens constitui-se de um recorte da área definida como a bacia hidrográfica do Rio Tapajós.

A imagem LANDSAT 7 é composta por 8 bandas espectrais, com resolução de 30 metros, que podem ser combinadas em diferentes possibilidades de composições coloridas e opções de processamento.

#### 4.2.2 Tratamento de Imagens

As técnicas de sensoriamento remoto, utilizadas no tratamento de imagens deste estudo, envolveram pré-processamentos com correção geométrica das imagens, processamento digital, classificação de imagens e pós-processamento. Através do SIG SPRING, as imagens de *landsat 7* passaram por diversos processos com o objetivo de se obter melhor qualidade final de mapa. Entre elas se destaca a técnica de eliminação de ruídos, que

tem por objetivo eliminar pontos de ruídos contidos nas imagens e a restauração, tendo como foco corrigir distorções inseridas pelo sensor óptico no processo de geração de imagens. Por meio da filtragem foi possível realçar a visualização das bandas, obtendo imagens com maior nitidez. O realce de imagem promove transformações e manipulações dos dados das bandas, facilitando a foto interpretação (AZEVEDO, 2014).

### 4.2.3 Seleção de Bandas

Foram utilizadas três bandas das imagens *landsat 7*, as bandas 5, 4 e 3 escolhidas em função de uma melhor resposta espectral na interpretação auxiliada por computador. As descrições das bandas para *landsat 7* podem ser visualizadas na tabela 02, mostrando os comprimentos de onda e as resoluções.

Tabela 2 - Descrição das bandas do LANDSAT 7

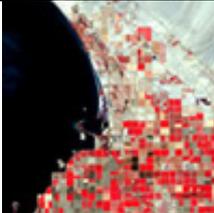
Landsat-8 Bands	Comprimento de Onda (micrometros)	Resolução (metros)
Band 1	0.45 – 0.52	30
Band 2	0.53 – 0.61	30
Band 3	0.63 – 0.69	30
Band 4	0.78 – 0.90	30
Band 5	1.55– 1.75	30
Band 6	10.4 – 12.5	60
Band 7	2.09 – 2.35	30
Band 8	0.52 – 0.90	15

Fonte: [http://landsat.usgs.gov/L7\\_band\\_combos.php](http://landsat.usgs.gov/L7_band_combos.php) (2017)

### 4.2.4 Composição Colorida

Na produção da composição colorida nas imagens *landsat 7*, foram utilizadas bandas 3 (vermelho), 4 (infravermelho próximo) e 5 (infravermelho médio) com a seguinte composição colorida. Foram associadas à banda 3 a cor azul, à banda 4 a cor verde e à banda 5 a cor vermelha, compreendendo a composição (3B-4G-5R), as composições dos canais do espaço RGB, são ilustradas na tabela 3.

Tabela 3 - Composições RGB de imagens Landsat

Composições	Resultado	<i>Landsat 7 ou Landsat 5</i>
	Infravermelho	4, 3, 2
	Cor Natural	3, 2, 1
	Falsa Cor	5,4,3
	Falsa Cor	7,5,3
444 	Falsa Cor	7,4,2

Fonte: [http://landsat.usgs.gov/L7\\_band\\_combos.php](http://landsat.usgs.gov/L7_band_combos.php) (2017)

#### 4.2.5 Classificação de Imagens

Como as imagens utilizadas são de épocas distintas, possuem diferentes características radiométricas, o que inviabilizava a simples união de bandas para formação das composições RGB e classificação. Com isso optou-se por trabalhar a imagem separadamente, na geração do mapa de uso e ocupação do solo.

A classificação de imagens é a associação de cada pixel à uma parte ou a um todo de um objeto do mundo real (MACHADO, 2002). Trata-se, portanto, de um problema de reconhecimento em que os valores numéricos presentes em uma imagem devem estar associados à identificação de diferentes tipos de cobertura da superfície da terra.

Processos de classificação automatizados proporcionam a determinação do uso da terra de maneira rápida, com baixo custo e boa precisão, associando valores numéricos, que

são as contagens em cada pixel, com correspondentes características de refletância espectral de cada uma das classes existentes na superfície (MACHADO, 2002).

A classificação multiespectral consiste em identificar, nas imagens, os diferentes alvos, fenômenos ou feições que apresentam padrões espectrais similares. Em outras palavras, é a associação de pontos de uma imagem a uma classe ou grupo: água, cultura agrícola, área urbana etc. Os dados gerados são essenciais para o conhecimento, o planejamento e a execução de atividades relacionadas com a área da bacia hidrográfica.

#### **4.2.6 Classificação Supervisionada**

Na classificação supervisionada, o usuário define inicialmente as assinaturas espectrais das categorias a serem classificadas, tais como: áreas urbanizadas, florestais ou recurso hídrico. Após isso, o algoritmo de classificação associa a cada pixel uma classe correspondente à assinatura espectral mais similar. Em suma, a classificação supervisionada defini os tipos de cobertura, cria as assinaturas dos pixels considerados da mesma classe, para assim, aplicar o método de classificação de probabilidade máxima e, por fim, realizar a filtragem e refinamento dos agrupamentos (FILHO, 1999).

Nas amostras definidas efetuou-se a classificação supervisionada através da função Máxima Verossimilhança (MaxVer). Dentre os algoritmos classificadores existentes, o de MaxVer é o classificador supervisionado mais aplicado para dados de satélite. É um método paramétrico, o qual supõe que cada classe é determinada por um modelo gaussiano multivariado e que determina, a partir de dados de treinamento, o vetor médio e a matriz de covariância (TISOT et. al., 2005).

#### **4.2.7 Uso e ocupação do Solo**

O SWAT tem um banco de dados de usos e ocupação de solo, baseado na USGS. As seguintes classes de uso do solo foram consideradas: rios e lagos, florestas, savana, pastagem, áreas agrícolas, áreas urbanas e solo exposto. As composições das imagens ETM, tem as seguintes chaves de interpretação, avaliando a textura, forma e cor:

- a) rios e lagos: cor azul (material em suspensão) ou preto (água limpa; textura lisa; forma irregular, linear retilínea ou curvilínea para rios);
- b) florestas: cor verde escuro; textura rugosa; forma irregular;
- c) pastagens: Cor rosa claro; textura lisa e forma irregular;

- d) áreas agrícolas: cor magenta (solo preparado ou cultura colhida), verde claro para cultura em estágio inicial e verde mais forte para cultura sadia e madura; textura lisa; forma regular/geométrica; padrão de talhões (divisão em parcelas); presença de sombras (áreas escuras) em culturas mais altas;
- e) áreas urbanas: cor magenta (rosa); textura ligeiramente rugosa; forma irregular; localização junto às rodovias.

Para a definição e confirmação dos pontos de assinaturas espectrais das amostras, além da chave de interpretação, também foram usados o levantamento de uso e ocupação do solo do diagnóstico da Br-163.

#### 4.2.8 Aquisição de Bases Vetoriais

Para dar suporte e embasamento ao estudo, a aquisição de bases vetoriais são necessárias para formulação do banco de dados que irão alimentar o SWAT. Algumas delas são apresentadas na tabela 04 abaixo.

Tabela 4 - Origem da base de dados

(Continua)		
<i>Base</i>	<i>Fonte</i>	<i>ANO</i>
Limites Municipais	IBGE	2012
Sedes Municipais	IBGE	2012
Localidades	IBGE	2012
Hidrografia	ANA	2003
Malha Viária	MMA	2001
Pedologia	EMBRAPA/FAO	2001
Vegetação	MMA	2004
Uso do Solo	ZEE BR 163	2009

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.2.9 Unidades Pedológicas

O mapa pedológico necessário para o modelo foi gerado através da simples união das cartas pedológicas mosaicadas no software *Arcview*, disponíveis em dois bancos de dados: o primeiro foi o do Zoneamento Econômico Ecológico da Amazônia Legal (ZEEAML), tendo como classificação a proposta pela EMBRAPA, disponíveis no site do MMA e o segundo da FAO.

#### 4.2.10 Aquisição de Cartas Topográficas

A área da bacia do rio Tapajós (aproximadamente 492.000 km<sup>2</sup>) foi discretizada em células de área igual a 1.800 m<sup>2</sup> (90m x 90m – 1,8 hectares) utilizando imagens do SRTM<sup>7</sup>, formando assim uma matriz de células sobre a bacia. A escolha da área da célula foi definida de forma a captar a resolução espacial máxima correlata com a qualidade das informações plani-altimétricas do modelo numérico do terreno (LIBOS, 2002).

O processo de simulação em uma bacia começa com o modelo numérico do terreno, que pode ser definido como a representação matemática de uma superfície ou feição altimétrica através das coordenadas X, Y e Z.

#### 4.2.11 Modelos Digitais de Elevação

A confecção do modelo numérico do terreno tem como finalidades delimitar as áreas de preservação permanente em função da declividade e demarcar as classes de declividade. Adicionalmente, foi aplicado o interpolador desenvolvido por Hutchinson (1989), criado para obter uma melhor representação da característica anisotrópica (ou direcional) do relevo. Hutchinson (1996) atualizou o algoritmo através do conceito de adaptação local, modelando o terreno interativamente com resoluções consecutivas crescentes até chegar à sua resolução final. Esse algoritmo permite ainda imposição das linhas de drenagem que garantem a integridade do declive do terreno na direção do escoamento superficial. Através da definição de tolerâncias horizontais e verticais, podem ser removidos pixels que interrompem o fluxo ao longo da rede de drenagem digitalizada ou que são identificadas como depressões fechadas (ZEILHOFER, 2001; LIBOS, 2002).

O modelo numérico do terreno foi gerado a partir das curvas de nível digitalizadas no programa ARCGIS® 10.1, este arquivo foi importado como arquivo vetorial. As curvas de nível apresentam uma equidistância de 50 metros, em escala de 1: 50.000.

Através do módulo TIN *interpolation* 32 foi gerada uma rede triangulada irregular utilizando o arquivo vetorial (curvas de nível) de isolinhas.

A partir da rede triangulada irregular foi criada uma imagem de superfície raster com o módulo TINSURF. Esta imagem assume o sistema de informação de referência do arquivo

---

<sup>7</sup> SRTM: consiste num sistema de radar especialmente modificado que voou a bordo do *Endeavour* (ônibus espacial) durante os 11 dias da missão STS-99, em Fevereiro de 2000. Para adquirir os dados de altimetria estereoscópica, a SRTM contou com dois refletores de antenas de radar.

vetorial de linha (rede triangulada irregular).

Considerando os aspectos da área de estudo, foram adaptados os intervalos de classes de declividade propostos por De Biasi (1972), assim foi criada a tabela 5, com o objetivo de geração, a partir do modelo numérico do terreno.

Tabela 5 - Classes de Declividades

<b>Classe</b>	<b>Limites</b>
Plano	0 a 3%
Suave Ondulado	3% a 8%
Ondulado	8% a 20%
Forte Ondulado	20% a 45%
Montanhoso	45% a 75%
Escarpado	Maior 75%

Fonte: De Biasi (1992).

#### 4.2.12 Rede de Drenagem

A rede de drenagem utilizada foi gerada através da união das imagens STRM 90x90, unidas no *software Quantum Gis 2.16*, cartas todas no Fuso 21 na escala 1:250.000, após isso, através das ferramentas de simulação de malha hidrográfica, disponíveis na interface Grass, disponível no QGis 2.16. Os resultados foram correlacionados, com modelos digitais gerados a partir das Cartas Geográficas elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e imagens ortorretificadas do satélite SPOTS, com intuito de confirmar resultados gerados.

#### 4.3 DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO DE SWAT

O SWAT requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada que se relacionam com as características físicas da bacia. À definição destes parâmetros apoiou-se quando possível em dados obtidos a partir de trabalhos anteriores, minimizando assim o levantamento de dados.

A aplicação do modelo SWAT ocorre com a divisão da Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós, a definição dos parâmetros do modelo para o caso em estudo, a calibração e simulação das vazões.

Para o desenvolvimento desse trabalho, os parâmetros requeridos pelo modelo SWAT

estão divididos em: modelos digitais de elevação, hidrografia, pedologia, uso e ocupação do solo e parâmetros climáticos.

O primeiro passo para o funcionamento do modelo SWAT ocorre na geração dos planos de informação cartográficos (PIs) que são realizados no ARCGIS® e a entrada dos dados alfanuméricos e dos PI's, necessários para o modelo SWAT, ocorre via uma interface apropriada, o *Basins*<sup>8</sup>.

O fluxograma exposto na figura 08 mostra o funcionamento esquemático do processo de modelagem em SWAT.

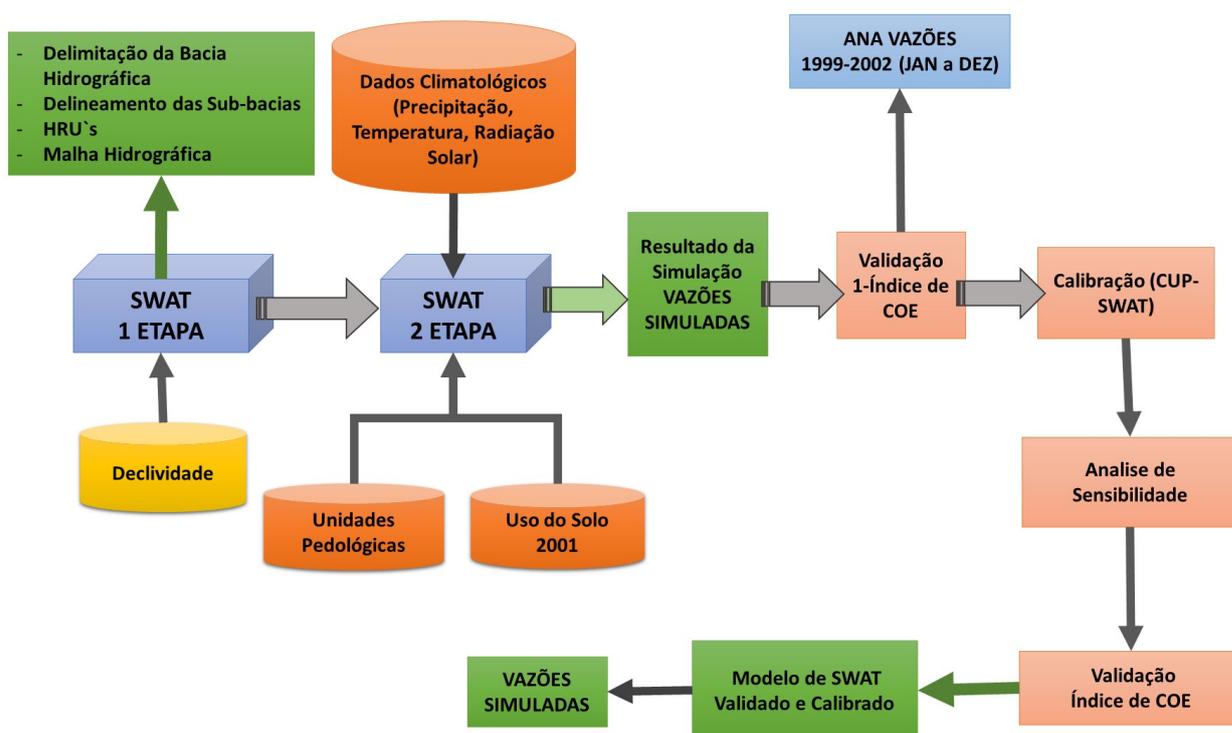


Figura 8 - Processo de funcionamento do SWAT adaptado de Machado (2002)  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

<sup>8</sup> Basins é uma interface do ARCGIS, onde as bacias de drenagem são delineadas dentro da janela de análise, identificando as linhas de cume entre as bacias. O raster da direção do fluxo de entrada é analisado para encontrar todos os conjuntos de células conectadas que pertencem à mesma bacia de drenagem. As bacias de drenagem são criadas localizando os pontos de vazamento nas bordas da janela de análise (onde a água derrama para fora do raster), bem como sumidouros, identificando então a área de contribuição acima de cada ponto de vazamento. Isto resulta em um raster de bacias de drenagem (ARCGIS 10.3).

### 4.3.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

Como a topografia é um dos principais fatores determinantes nos processos de transporte de água e materiais, os modelos que tratam da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica requerem dados baseados nas características topográficas desta bacia tais como: limites das bacias e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento de rampa, forma do declive, aspecto, canais de drenagem e conexões entre áreas, que definirão como a água se move através da paisagem. Estes atributos topográficos podem ser computados a partir de um Modelo Numérico de Terreno (MNT) usando-se uma variedade de técnicas. A estrutura ideal para um MNT depende do objetivo do uso do dado e de como este pode se relacionar com a estrutura de um modelo (MOORE et al., 1993).

Inicialmente, para a delimitação da bacia hidrográfica do Rio Tapajós no modelo SWAT, deve-se inserir um modelo numérico de terreno, o qual será o princípio para que, através das altitudes contidas nesse modelo, sejam determinados os caminhos dos cursos de água que se destinarão ao exutório como destino final.

### 4.3.2 Mapa Pedológico

Para o funcionamento da modelagem em SWAT são necessárias informações das características físico-hídricas de cada classe de solo, como os grupos de saturação (HYDGRP), a profundidade de raiz (SOL\_ZMX), porosidade (ANION\_EXCL), profundidade da camada (SOL\_Z), densidade aparente (SOL\_BD), capacidade de água no solo (SOL\_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL\_K), erodibilidade (USLE\_K), albedo (SOL\_ALB), carbono orgânico (SOL\_CBN) e percentagem de argila, silte, areia e seixo.

#### 4.3.2.1 Grupos Hidrológicos (HYDGRP)

De acordo com o *U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS Soil Survey Staff, 1986)*, os solos são classificados em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) em função dos valores de condutividade hidráulica (mm/h) de cada classe de solo nos seus distintos horizontes, os quais são:

- a) grupo hidrológico A – solos com alta taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada >150 mm/h, solos constituídos de areias grossas e excessivamente drenados.

- Estes solos têm alta taxa de transmissão de água (baixo *Runoff* potencial);
- b) grupo hidrológico B – solos com moderada taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 5 e 150 mm/h, solos constituídos de sedimentos moderadamente grossos a moderadamente finos e moderadamente bem drenados. Estes solos têm moderada taxa de transmissão de água;
  - c) grupo hidrológico C – solos com baixa taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/h, com textura moderadamente fina a fina, que impedem o movimento da água nos horizontes. Estes solos têm baixa taxa de transmissão de água (alto *runoff* potencial);
  - d) grupo hidrológico D – solos com baixíssima taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada menor 1mm/h, são solos potencialmente argilosos com altíssimo *runoff* potencial, esses solos tem baixíssima taxa de transmissão de água.

#### 4.3.2.2 Profundidade de Raiz (SOL\_ZMX)

Segundo Vieira (1987), os solos da Amazônia são profundos e bem drenados. Desse modo, quanto a profundidade das raízes foi considerado que elas podem se desenvolver por toda a profundidade da camada do solo.

#### 4.3.2.3 Porosidade (ANION\_EXCL)

A fração de porosidade é definida pela relação entre o volume ocupado pelos poros e o volume total do solo (REICHARDT, 1995). Devido à complexidade para se medir o volume de poros, a fração de porosidade foi estimada por meio da densidade do solo, equação 6.

$$ANION_{EXCL} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (6)$$

Onde  $\rho_b$  é a densidade do solo ou aparente, ou seja, é a densidade das partículas na presença de ar, e  $\rho_s$  é a densidade real das partículas sem ar.

#### 4.3.2.4 Profundidade da Camada (SOL\_Z)

O SOL\_Z é a profundidade de cada camada para cada horizonte das unidades

pedológicas. A figura 9 mostra um solo de uma unidade pedologia “A”, por exemplo, com 3 horizontes, em que a distância entre cada horizonte é a profundidade da camada (SOL\_Z).

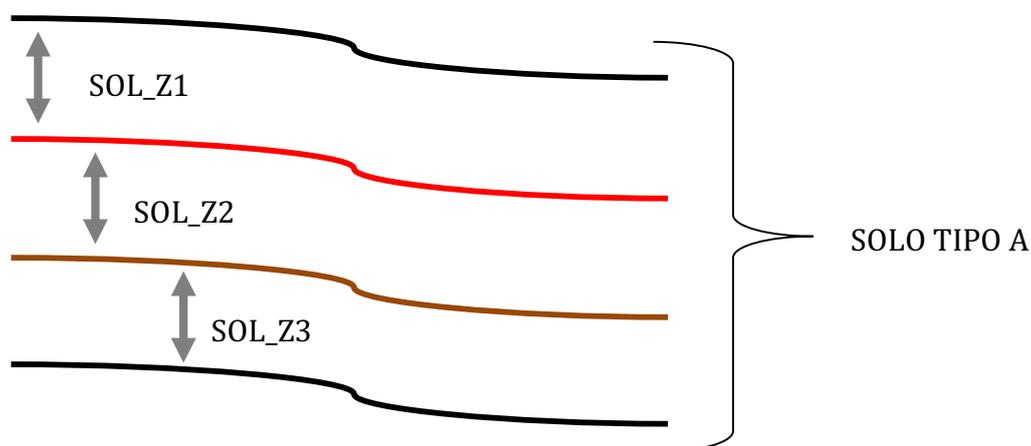


Figura 9 - Modelo conceitual da profundidade da camada

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.3.2.5 Densidade Aparente (SOL\_BD)

A densidade aparente ou do solo geralmente é calculada durante os levantamentos de campo, onde  $\rho_b = m/v$ , entretanto, segundo Taylor et al. (1966) há uma relação entre a textura do solo com a densidade aparente, conforme apresentado na Tabela 06.

Tabela 6 - Classificação textural e densidade aparente do solo

Material	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Solos recentemente cultivados	0,90 - 1,2
Solos com superfície mineral, não recentemente cultivados, mas não compactados.	1,1 - 1,4
Solos com restrição raiz	
Areias e francos	< 1,6 - 1,8
Siltes	< 1,4 - 1,6
Argilas	Extremamente variável

Fonte: Taylor et al. (1966)

A textura do solo pode ser obtida através da utilização do triângulo de classificação textural do solo. Este sistema foi desenvolvido pelo *U.S. Department of Agriculture* e *U.S. Soil Conservation Service*. Neste sistema, a porcentagem relativa das três partículas dimensiona as categorias a serem consideradas. As três categorias de partículas são areia, silte e argila.

O diagrama triangular é subdividido dentro de vários tipos de classificação textural de

solo, com cada tipo de solo compreendendo uma série de porcentagens dos três tipos de partícula. O tipo de classificação de solo é determinado plotando as porcentagens de cada uma das três classes de partícula de solo no diagrama triangular. O ponto de interseção de cada uma destas três porcentagens de classe de partícula indicará um ou mais tipos de classificação de solo, como mostra o Triângulo de Classificação (Figura 10).

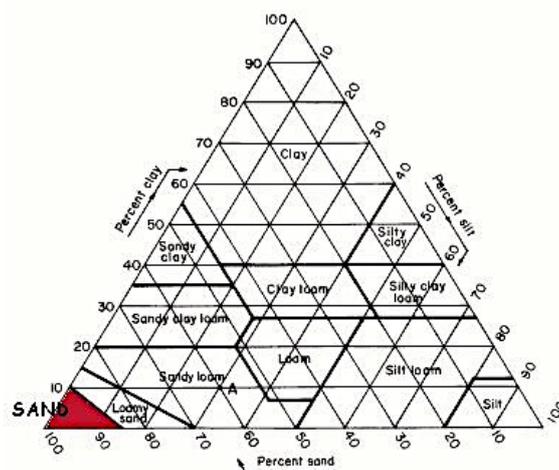


Figura 10 - Triângulo de classificação textural do solo  
Fonte: USDA (1986).

#### 4.3.2.6 Capacidade de Água no Solo (SOL\_AWC)

A capacidade de água no solo pode também ser considerada como a quantidade de água disponível para as plantas, ela é calculada subtraindo o conteúdo de água na capacidade de campo (FC), da capacidade de água no ponto de murcha (WP).

A capacidade do campo é definida como a umidade que um dado solo sustenta sob a ação da gravidade, na prática significa a umidade da amostra de solo quando submetida a uma tensão de 0,033 MPa e o ponto murcha permanente é a umidade do solo na qual as plantas não mais conseguem manter suas folhas túrgidas, cuja quantidade de água retida no solo possui uma tensão de 1,5 MPa.

Como a quantidade de água retida no solo (SOL\_AWC) é uma relação entre a capacidade do campo e o ponto de murcha permanente é considerado a água disponível para a extração da planta, pode-se determinar a capacidade de água no solo através da equação 7.

$$SOL\_AWC = FC - WP \quad (7)$$

Onde: (FC) conteúdo de água na capacidade de campo;

(WP) capacidade de água no ponto de murcha.

No caso da classe em que não há dados de capacidade de campo e de ponto de murcha permanente, os dados de capacidade de água no solo podem ser obtidos através da classe textural, tabela 07.

Tabela 7 - Classificação textural e capacidade de água no solo

<i>Classe textural Areia</i>	<i>Capacidade de água disponível (mm/m)</i>
Areia	150
Areia Franca	158
Franco Arenoso	175
Franco	175
Franco Siltoso	192
Franco Argilo Arenoso	150
Franco Argiloso	183
Franco ArgiloSiltoso	192
Argila Arenosa	142
Argila Siltosa	183
Argila	175

Fonte: Salter; Williams (1967 / 1969)

#### 4.3.2.7 Condutividade Hidráulica Saturada (SOL\_K)

Embora a condutividade hidráulica seja um parâmetro medido em campo, Dent; Young (1981) relacionam a textura e a estrutura do solo com a condutividade hidráulica, conforme pode ser visto na tabela 08.

Tabela 8 - Classificação textural e condutividade hidráulica

Textura	Estrutura	Condutividade Hidráulica Saturada (cm/h)
Areia	Esferoidal com grão simples	25 – 50
Areia Franca	Esferoidal com grumo médio ou grão simples	12 – 25
Franco Arenoso	Blocos angulares e subangulares ou esferoidal com grumo fino	6 – 12
Franco Argiloso, Siltoso, Franco Siltoso, Franco arenoso e Franco	Prismática média e blocos subangulares	2–6
Argila, Argila Siltosa, Argila Arenosa, Franco Argila Siltoso, Franco Argiloso, Franco Siltoso, Siltoso, Franco Argilo Arenoso	Prismática fina ou média, blocos angulares e laminar	0,5 – 2,0
Argila, Franco Argiloso, Argila Siltosa, Franco Argilo Arenoso	Prismático fina ou muito fina, blocos angulares e laminar	0,25 – 0,50
Argila	Colunar	< 0,25

Fonte: Dent; Young (1981).

#### 4.3.2.8 Erodibilidade (USLE\_K)

Para a estimativa de erodibilidade ( $K_{USLE}$ ) que expressa a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, Williams (1975) propôs a equação 8:

$$K_{uscle} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \quad (8)$$

Onde:

$f_{csand}$  – fração de solos com alto conteúdo de areia grossa (equação 9);

$f_{cl-si}$  – fração de solos com alta razão de silte e argila (equação 10);

$f_{orgc}$  – fração de solos com alto conteúdo de carbono orgânico (equação 11);

$f_{hisand}$  – fração de solos com conteúdo extremamente alto de areia (equação 12).

Equações para o cálculo dos fatores de erodibilidade:

$$f_{csand} = \left( 0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[ -0,256 \cdot m_s \cdot \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \quad (9)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3} \quad (10)$$

$$f_{org} = 1 - \frac{0,25.orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95.orgC]} \quad (11)$$

$$f_{hisand} = \left[ \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)]} \right] \quad (12)$$

Onde:

$m_s$  é a fração de areia (diâmetros 0,05 – 2,00 mm);

$m_{silt}$  é a fração de silte (diâmetros 0,002 – 0,05 mm);

$m_c$  é a fração de argila (< 0.002 mm) e;

$orgC$  é o percentual de carbono orgânico na camada.

Segundo Wischmeier; Smith (1978) um solo diminui sua tendência a erodibilidade quanto maior sua fração de silte e menor a de areia e argila.

#### 4.3.2.9 Albedo (SOL\_ALB)

O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. O valor do albedo de uma região agrícola pode variar de acordo com a fase do ciclo de cultivo, alternando assim entre o solo lavrado e recém semeado, praticamente nu, e a fase de crescimento e maturação. Em regiões com uma destacada época seca sazonal, o albedo de pastagens também pode aumentar, atingindo valores mais próximos do solo nu (COLLISCHONN, 2001).

#### 4.3.2.10 Carbono Orgânico (SOL\_CBN)

Conceição et al. (2005) mencionam que o carbono orgânico e seu estoque têm sido utilizados como indicadores do efeito de sistemas de manejo na qualidade do solo. O carbono orgânico no solo pode ser obtido a partir do teor matéria orgânica (MO) e é calculado através da equação 13.

$$OrgC = \frac{MO}{1,72} \quad (13)$$

#### 4.3.2.11 Percentagem de Argila, Silte, Areia e Seixo

As percentagens de argila, silte, areia e seixo foram classificadas de acordo com o USDA, conforme a tabela 9.

Tabela 9 - Classificação granulométricas do solo

<b>Classificação granulométrica</b>	
Cascalho	>2 mm
Areia	2 a 0,005 mm
Silte	0,05 a 0,002 mm
Argila	0,002

Fonte: Elaborada pelo autor (2017), adaptada da USDA.

#### 4.3.2.12 Origem das Entradas Pedológicas

O solo é um componente ambiental complexo, suas variações, no que se refere às propriedades físicas, químicas e biológicas são definidoras de padrões ecológicos e do próprio uso da terra, cujo potencial, a humanidade busca aproveitar para erguer as bases da sobrevivência, mas nem sempre de forma sustentável. O solo, como recurso para produção agrícola e pecuária pressupõe, no mínimo, uma visão global de suas características, principais limitações, susceptibilidade à erosão e áreas de ocorrências (MOREIRA; VASCONCELOS, 2007). A classificação das entradas de solo para este trabalho terão duas origens distintas, uma vinda da EMBRAPA e outra vinda da FAO.

##### 4.3.2.12.1 Classificação de Solo da Embrapa

Na região Amazônica, a diversidade de solos é um reflexo dos fatores de formação como relevo, geologia, clima, bióticos e feições da paisagem (VALES, 2011). Conforme pode ser visualizado na figura 11 as classificações propostas pela EMBRAPA.

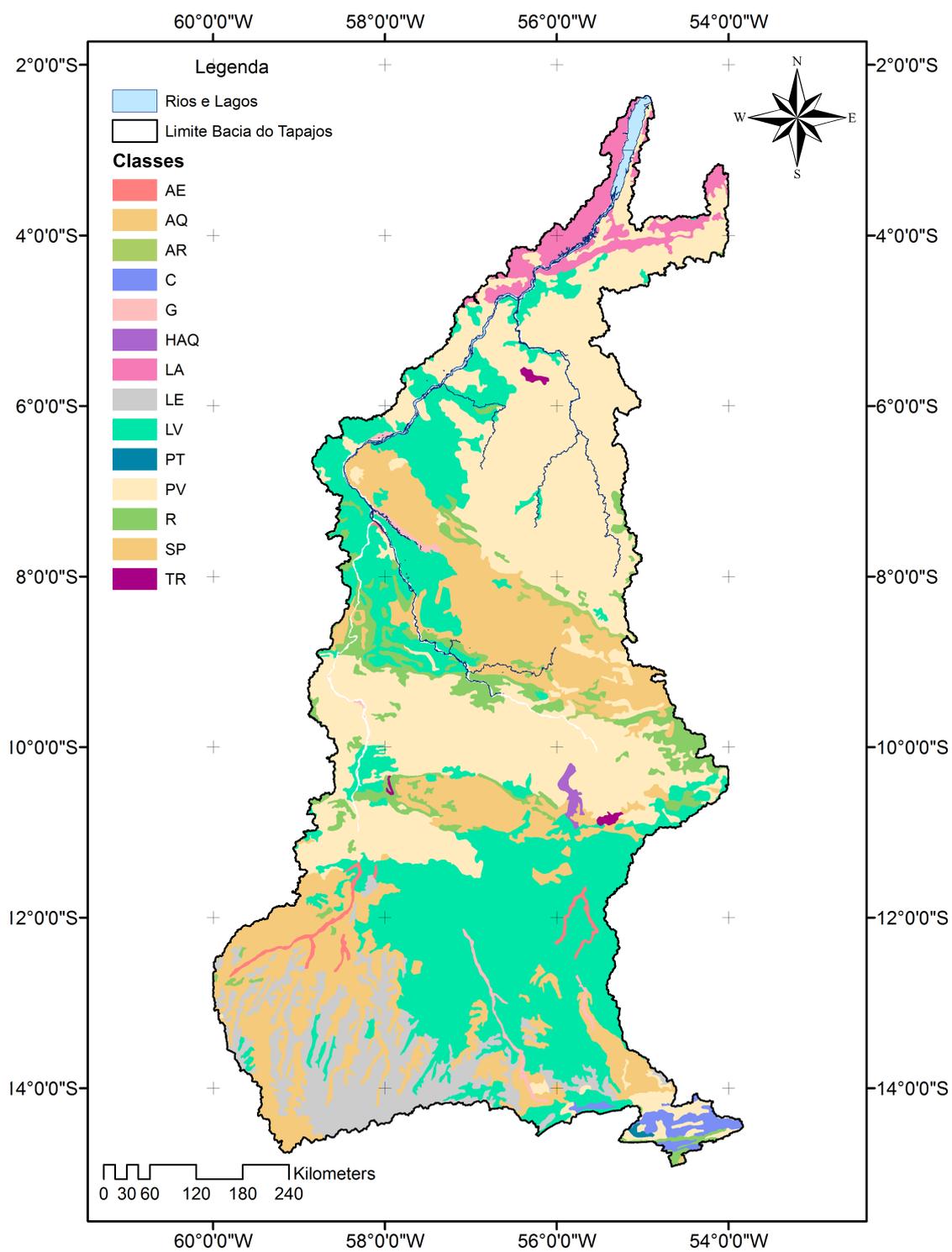


Figura 11 - Mapa das Unidades pedológicas para bacia do rio tapajós segundo a EMBRAPA  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O levantamento de solos na bacia rio Tapajós realizado pela EMBRAPA inventariou os seguintes tipos: Solos Aluviais (AE) representado apenas por 0,70%; Areias Quartzosas (AQ) 18,16%; Afloramento de Rochas (AR) 0,31%; Cambissolo (C) 0,60%; Gleissolo (G) 0,94%; Latossolo Amarelo (LA) 5,86%; Latossolo Vermelho-Escuro (LE) 6,64%; Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) 27,45%; Plintossolo (PT) 0,06%; Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) 33,15%; Solos Litólicos (R) 5,14%; Solos Petroplínticos (SP) 0,83% e Terra Roxa Estruturada (TR) 0,17%. A distribuição quantitativa das classes pedológicas na bacia hidrográfica do rio Tapajós é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes pedológicas distribuídas, segundo classificação EMBRAPA e a área (%) ocupada na bacia do rio Tapajós.

<b>Pedologia</b>	<b>Área</b>	<b>%</b>
Solos Aluviais	3584394,01	0,70%
Areias Quartzosas	93276648,68	18,16%
Afloramento de Rochas	1569452,94	0,31%
Cambissolo	3100015,81	0,60%
Gleissolo	4823781,07	0,94%
Latossolo Amarelo	30111345,25	5,86%
Latossolo Vermelho-Escuro	34112089,16	6,64%
Latossolo Vermelho-Amarelo	140999281,9	27,45%
Plintossolo	284045,54	0,06%
Podzólico Vermelho-Amarelo	170311052,3	33,15%
Solos Litólicos	26396069,52	5,14%
Solos Petroplínticos	4260860,05	0,83%
Terra Roxa Estruturada	853707,65	0,17%

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) ocupa cerca de 33,15% da área da bacia do Tapajós. São solos minerais não hidromórficos, com horizonte B textural não plíntico e distinta individualização de horizontes no que diz respeito à cor, estrutura e textura, a qual é mais leve no A (mais arenosa) e mais pesada (mais argilosa) no B, com cores variando de vermelho a amarelo e teores de  $Fe_2O_3$ , normalmente menores que 11%. São profundos a pouco profundos, moderadamente a bem drenados, com textura muito variável, porém, com predomínio de textura média no A e argilosa no horizonte Bt, com presença ou não de cascalhos. Solos com textura arenosa no A e média no B, ou somente argilosa ou média ao longo do perfil, são menos frequentes. Ocasionalmente, podem ocorrer pedras em alguns destes solos. São solos que apresentam uma porosidade total baixa a média, com valores compreendidos entre 37 e 50%. Quanto à densidade aparente verificam-se valores

compreendidos numa faixa de 1,32 a 1,63 g/cm<sup>3</sup>. A grande maioria dos Podzólicos Vermelho-Amarelos de Mato Grosso possui argila de atividade baixa, ou seja, inferior a 24 meq/100g de argila (MERCURI, 2011).

O latossolo vermelho-amarelo com 27,45% são solos minerais não hidromórficos, com horizonte B latossólico, cores normalmente vermelhas a vermelho-amareladas, com teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(proveniente do ataque sulfúrico) iguais ou inferiores a 11% e, normalmente, acima de 7%, quando os solos são argilosos ou muito argilosos e não concrecionários. São solos que não apresentam atração magnética. São profundos ou muito profundos, bem drenados, com textura argilosa, muito argilosa ou média. Os solos de textura argilosa ou muito argilosa e de constituição mais oxidica possuem baixa densidade aparente (0,86 a 1,21 g/cm<sup>3</sup>) e porosidade total alta a muito alta (56 a 68%). Os solos de textura média, normalmente, possuem densidade aparente pouco maior e porosidade total média. São solos ácidos a muito ácidos, com saturação de bases baixa (distróficos) e por vezes, álicos, neste caso com alumínio trocável maior que 50% (MERCURI, 2011). As origens dos parâmetros físico-hídricos estão descritas na tabela 11, e os valores dos parâmetros na tabela 12.

Tabela 11 - Origem dos parâmetros pedológicos, conforme classificação da Embrapa

<b>Tipo</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Autor</b>	<b>Titulo</b>
Solo aluvial	AE		
Areia quartzosa	AQ		
Plintossolo	PT		
Solo litólico	R		
Latossolo vermelho escuro	LE	BALDISSERA, 2005	Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológicas wat (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT.
Latossolo vermelho amarelo	LV		
Podzólico vermelho amarelo	PV		
Cambisolo	C		
Latossolo Amarelo	LA	SILVA, 2015	SWAT applications in eastern Amazonia: A case study of the Acará Mirim and Bujaru river basin in State of Pará, Brazil.
Solos Petroplinticos Afloramento de Rochas	SP AF	LIMA, 2013	Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado.
Terra Rocha estruturada/Nitossolos	TR	Realizado pelo autor (2016).	

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para o tipo de solo Terra rocha estruturada foram realizadas amostragem de solo em 5 pontos distintos no município do Trairão-PA, foram realizados análises de carbono orgânico, areia, argila e silte, seguindo metodologias descritas no manual de solos da EMBRAPA (1997).

Tabela 12 - Características Físicas das classes de solo, segundo a classificação da EMBRAPA

CLASSES	AE	AQ	PT	R	LE	LV	PV	C	LA	SP	TR	AF
<b>NLAYERS</b>	4	4	4	2	5	4	3	5	3	3	1	1
<b>HYDGRP</b>	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B		D
<b>SOL_ZMX</b>	1400	1500	730	800	940	1500	1300	1100		1300	20	300
<b>ANION_EX C</b>	0,33	0,37	0,34	0,4	0,3	0,38	0,32	0,47		0,32	0,5	
<b>SOL_Z1</b>	130	180	100	50	110	360	200	300	500	200	20	300
<b>SOL_BD1</b>	1,6	1,7	1,69	1,6	1,6	1,5	1,7	1,6	1,22	1,7	1,27	2,62
<b>SOL_AWC 1</b>	1,4	0	0,18	0,15	0	0,3	0,4	0,15	0,35	0,4	0,113	0,01
<b>SOL_K1</b>	32,5	90	90	12,5	90	12,5	90	12,5	201	90	2,78	0,01
<b>SOL_CBN1</b>	1,7	0,5	1,31	0,4	0,8	1,1	1,3	1,4	10	1,3	6,3	0,01
<b>CLAY1</b>	13,7	7,2	18,2	17,2	12,6	30,3	11,7	36,3	14	11,7	49,98	0
<b>SILT1</b>	56,7	14,9	27,6	29,4	9,4	16	18,1	18	7	18,1	26,1	0
<b>SAND1</b>	29,6	77,9	54,2	53,4	78	53,7	70,2	93,4	79	70,2	23,93	0,01
<b>ROCK1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99,99
<b>SOL_ALB1</b>	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,15	0,0078	
<b>USLE_K1</b>	0,16	0,14	0,15	0,17	0,12	0,13	0,14	0,05	0,15	0,14	0,11	0,01
<b>SOL_EC1</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
<b>SOL_Z2</b>	530	340	270	300	290	760	550	600	1000	550		
<b>SOL_BD2</b>	1,6	1,6	1,51	1,6	1,5	1,7	1,7	1,4	1,2	1,7		
<b>SOL_AWC 2</b>	1,2	0,1	0,15	0,15	0,1	0,3	0,4	0,18	0,35	0,4		
<b>SOL_K2</b>	12,5	90	12,5	12,5	90	12,5	90	12,5	205	90		
<b>SOL_CBN2</b>	0,5	0,4	0,39	0,6	0,5	0,2	0,6	0,6	7,5	0,6		
<b>CLAY2</b>	13,3	10,8	20,2	24,7	14,5	29,8	18,8	34	16	18,8		
<b>SILT2</b>	46	8,6	27,8	25,6	5,6	14,3	17,2	35,7	4,6	17,2		
<b>SAND2</b>	40,7	80,6	52	49,7	79,9	55,9	64	30,3	79,4	64		
<b>ROCK2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>SOL_ALB2</b>	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,15		
<b>USLE_K2</b>	0,18	0,12	0,17	0,16	0,1	0,14	0,15	0,16	0,19	0,15		
<b>SOL_EC2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>SOL_Z3</b>	960	670	520	300	670	1210	1300	800	2000	1300		
<b>SOL_BD3</b>	1,5	1,6	1,4	1,6	1,7	1,7	1,7	1,4	1,5	1,7		
<b>SOL_AWC 3</b>	1,4	0,2	0,35	0,15	0	0,4	0,7	0,18	0,42	0,7		
<b>SOL_K3</b>	12,5	90	12,5	12,5	90	12,5	12,5	12,5	230	12,5		

Tabela 12 - Características Físicas das classes de solo, segundo a classificação da EMBRAPA  
(Continuação)

<b>SOL_CBN3</b>	1,3	0,3	0,32	0,6	0,3	0,5	0,3	0,4	8,2	0,3
<b>CLAY3</b>	23	10,3	26,7	24,7	19,8	29,5	20,8	28,4	22	20,8
<b>SILT3</b>	68,1	15,6	27	25,6	9,4	13,8	18,3	37,7	6	18,3
<b>SAND3</b>	8,9	74,1	46,3	49,7	70,8	56,7	60,9	33,9	72	60,9
<b>ROCK3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SOL_ALB3</b>	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0	0,16	0,15
<b>USLE_K3</b>	0,27	0,15	0,16	0,16	0,13	0,14	0,16	0,17	0,2	0,16
<b>SOL_EC3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>SOL_Z4</b>	1400	1500	730	800	940	1500	0	1100		
<b>SOL_BD4</b>	1,5	1,6	1,52	1,3	1,4	1,6	0	1,8		
<b>SOL_AWC 4</b>	1,4	0,2	0,27	0,18	0	0,4	0	0,18		
<b>SOL_K4</b>	12,5	90	12,5	12,5	12,5	12,5	0	40		
<b>SOL_CBN4</b>	0,6	0,2	0,21	0,76	0,3	0,4	0	0,4		
<b>CLAY4</b>	27,7	13,2	32,7	32	24	35,6	0	26,8		
<b>SILT4</b>	67,4	15,2	29,9	35	11,1	15,9	0	43,7		
<b>SAND4</b>	14,95	71,6	37,4	33	64,9	48,5	0	29,5		
<b>ROCK4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>SOL_ALB4</b>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0	0,15		
<b>USLE_K4</b>	0,25	0,15	0,16	0,16	0,14	0,14	0	0,18		
<b>SOL_EC4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>SOL_Z5</b>	0	0	0	0	1500	0	0	1170		
<b>SOL_BD5</b>	0	0	0	0	1,5	0	0	1,4		
<b>SOL_AWC 5</b>	0	0	0	0	0,1	0	0	0,18		
<b>SOL_K5</b>	0	0	0	0	12,5	0	0	12,5		
<b>SOL_CBN5</b>	0	0	0	0	0,2	0	0	0,3		
<b>CLAY5</b>	0	0	0	0	23,8	0	0	27		
<b>SILT5</b>	0	0	0	0	9,8	0	0	39,3		
<b>SAND5</b>	0	0	0	0	66,4	0	0	33,7		

(Conclusão)

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

#### 4.3.2.12.2 Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO

A classificação pedológica, segundo a FAO, na área da bacia do rio Tapajós é apresentada na tabela 13 e a distribuição espacial é mostrada na figura 12.

Tabela 13 – Classes de solo distribuídas segundo classificação FAO e a área (%) ocupada na bacia do rio Tapajós

Tipo	Área (KM2)	%	
Acrisols	AC	6663536,61	12,68%
Arenosols	AR	9992,98	0,02%
Cambisols	CM	345711,21	0,66%
Ferralsols	FR	35991925,33	68,48%
Gleysols	GL	762272,58	1,45%
Leptosols	LP	4265199,08	8,11%
Regosols	RG	4520947,49	8,60%

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

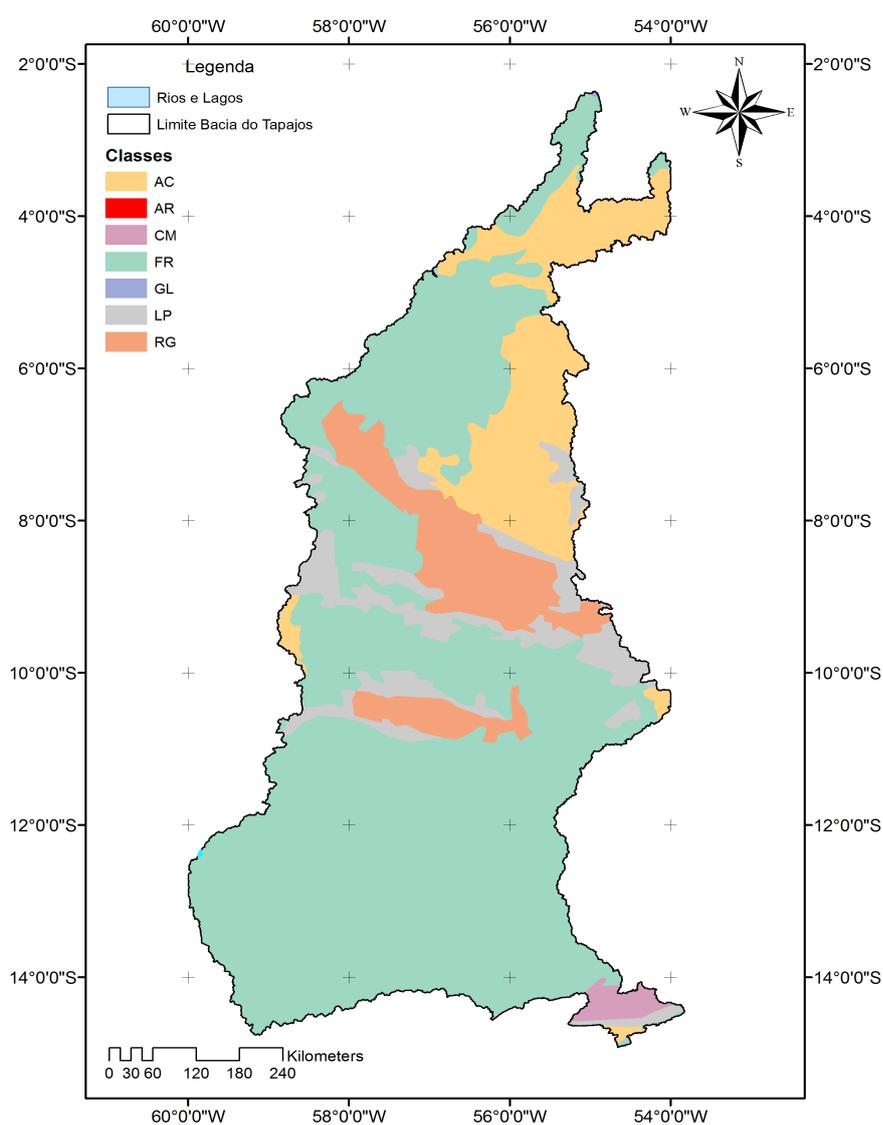


Figura 12 - Mapa das unidades pedológicas para bacia do rio Tapajós segundo a FAO  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A tabela 14 ilustra a origem dos parâmetros de entrada da FAO, conforme sugerido por (GIES, 2016).

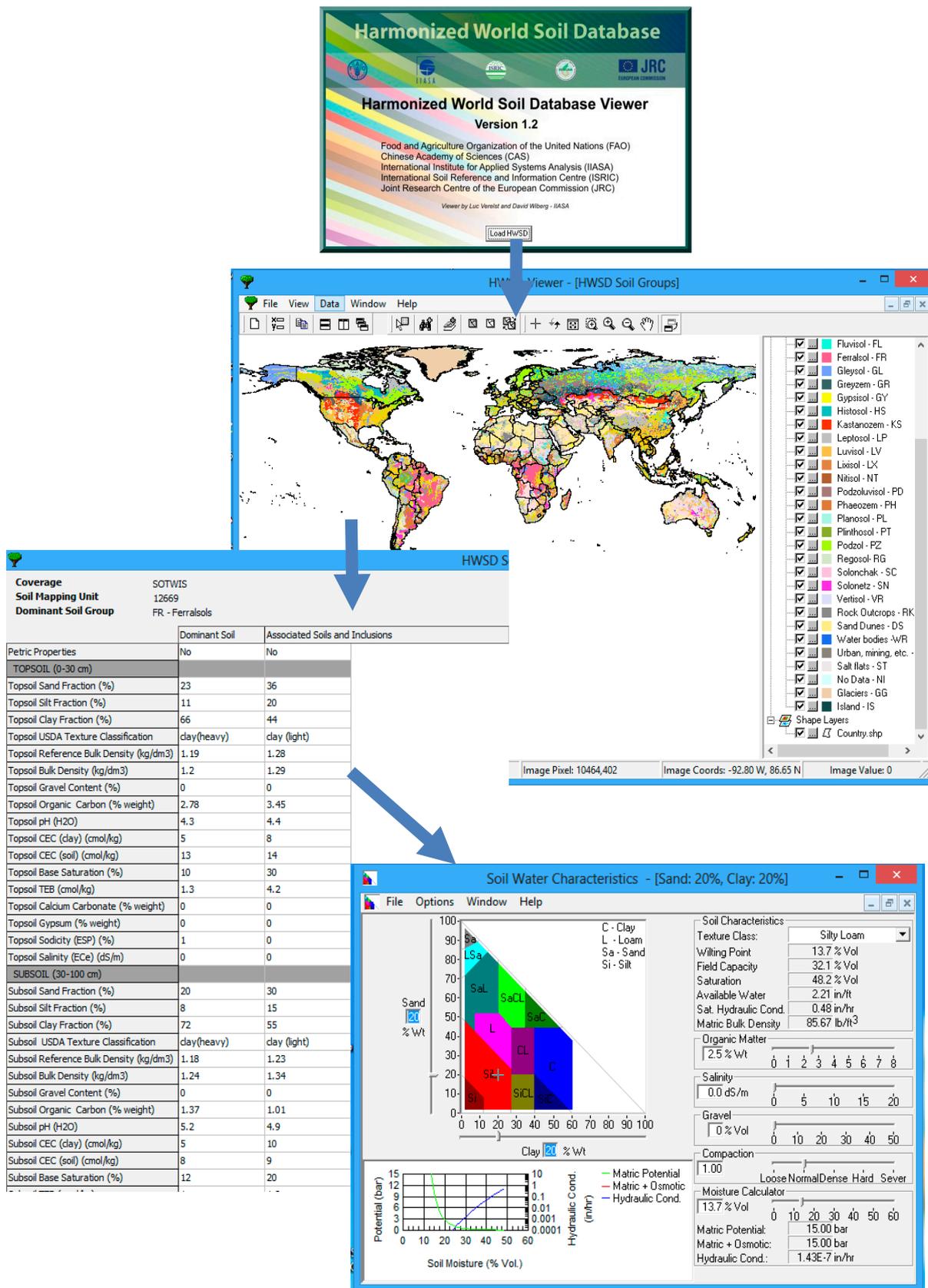
Tabela 14 - Origem dos parâmetros de solo, conforme classificação proposta da FAO

	<b>Parâmetro</b>	<b>Origem dos Dados</b>
<b>Nome dos Solo</b>	SNAM	ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset
<b>Quantidade Horizonte</b>	NLAYERS	ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset
<b>Grupo Hidrológico</b>	HYDGRP	U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS Soil Survey Staff, 1986)
<b>Porosidade</b>	ANION_EXC	Manual do SWAT
<b>Profundidade da camada</b>	SOL_Z1	ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset
<b>Densidade</b>	SOL_BD1	
<b>Capacidade de água no Solo</b>	SOL_AWC1	SPAW
<b>Condutividade Hidráulica</b>	SOL_K1	
<b>Carbono Orgânico</b>	SOL_CBN1	
<b>% Argila</b>	CLAY1	
<b>% Silte</b>	SILT1	ISRIC-WISE Harmonized Global Soil Profile Dataset
<b>% Areia</b>	SAND1	
<b>% Rocha</b>	ROCK1	
<b>Albedo</b>	SOL_ALB1	Equation proposed by Baumer (1990) as used in WEPP
<b>Erodibilidade</b>	USLE_K1	Equation proposed by Williams (1995) as cited in SWAT theoretical documentation

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O software ISRIC-WISE da *Harmonized Global Soil Profile Dataset* contém um banco de dados com os tipos de solo disponíveis na FAO, neste há diversos parâmetros de cada tipo de solo, tais como: porcentagem de argila, silte, areia, cascalho, matéria orgânica e profundidade da camada, conforme pode ser visto na figura 13. Com base nestes dados de entradas aplicou-se no software *SOIL WATER CHARACTERISTICS*, foram calculados a densidade, capacidade de água no solo, condutividade hidráulica, conforme é ilustrado na figura 13, e na tabela 15 estão ilustrados os parâmetros físico-hídricos da classificação da FAO.

Figura 13 - Fluxograma de geração de parâmetros de solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Tabela 15 - Características físico-hídricas das classes de pedológicas, segundo a classificação da FAO

(Continua)

TIPO	AC	AR	CM	FR	GL	LP	RG
NLAYERS	2	2	3	3	4	3	3
HYDGRP	C	C	C	A	B	C	A
SOL_ZMX	100	100	100	100	100	100	100
ANION_EXC							
L	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
SOL_CRK	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
TEXTURE	C	SICL	C	S	SL	L	S
SOL_Z1	30	100	100	100	100	100	100
SOL_BD1	1,373	1,371	1,281	1,480	1,565	1,534	1,505
SOL_AWC1	0,126	0,187	0,114	0,037	0,074	0,142	0,038
SOL_K1	1,226	3,417	0,440	164,477	45,335	8,696	111,739
SOL_CBN1	2,110	1,090	1,670	0,850	1	0,890	1,000
CLAY1	46	31	59	2	11	21	5
SILT1	24	67	19	3	16	43	2
SAND1	30	2	22	95	73	36	93
ROCK1	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB1	0,1405	0,2834	0,1902	0,3343	0,3015	0,3253	0,3015
USLE_K1	0,1106	0,3643	0,1048	0,0720	0,1441	0,1686	0,0577
SOL_EC1	1	1	1	1	1	1	1
SOL_Z2	100	100	100	100	100	100	100
SOL_BD2	1,51	1,61	1,48	1,59	1,49	1,60	1,50
SOL_AWC2	0,04	0,10	0,12	0,07	0,11	0,06	0,05
SOL_K2	111,74	30,93	0,94	24,20	1,85	39,91	105,23
SOL_CBN2	1	0,39	0,81	0,88	2,13	0,45	1,21
CLAY2	5	11	42	18	38	13	5
SILT2	2	30	15	7	11	9	6
SAND2	93	59	43	75	51	78	89
ROCK2	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB2	0,302	0,459	0,344	0,328	0,139	0,440	0,261
USLE_K2	0,058	0,180	0,128	0,114	0,097	0,124	0,076
SOL_EC2	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z3	0	0	100	100	30	100	100
SOL_BD3	0	0	1,47	1,56	1,37	1,41	1,55
SOL_AWC3	0	0	0,13	0,07	0,13	0,14	0,08
SOL_K3	0	0	1,86	39,53	1,23	1,77	46,58
SOL_CBN3	0	0	0,88	1,27	2,11	0,72	1,3
CLAY3	0	0	38	13	46	40	11
SILT3	0	0	25	13	24	36	16
SAND3	0	0	37	74	30	24	73
ROCK3	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB3	0	0	0,33	0,25	0,14	0,37	0,25

Tabela 15 - Características físico-hídricas das classes de pedológicas, segundo a classificação da FAO

(Conclusão)							
TIPO	AC	AR	CM	FR	GL	LP	RG
USLE_K3	0	0	0,14	0,13	0,11	0,16	0,13
SOL_EC3	0	0	0	0	0	0	0
SOL_Z4	0	0	0	0	100	0	0
SOL_BD4	0	0	0	0	1,565	0	0
SOL_AWC4	0	0	0	0	0,074	0	0
SOL_K4	0	0	0	0	45,335	0	0
SOL_CBN4	0	0	0	0	1	0	0
CLAY4	0	0	0	0	11	0	0
SILT4	0	0	0	0	16	0	0
SAND4	0	0	0	0	73	0	0
ROCK4	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB4	0	0	0	0	0,302	0	0
USLE_K4	0	0	0	0	0,144	0	0
SOL_EC4	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: elaborada pelo autor (2017).

#### 4.3.3 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

Com a investigação visual detalhada e a classificação supervisionada das 17 imagens *Landsat 7* (2001/2007), as quais, foram agrupadas em sete classes de uso e ocupação do solo: rios e lago, floresta, pastagens, savanas, áreas agrícolas, áreas urbanas e solo exposto. Esta classificação foi baseada na classificação de uso e ocupação do solo da proposta pela USGS, pois é uma das opções de banco de dados dispostas no SWAT.

#### 4.3.4 Parâmetros Climáticos

Quanto aos parâmetros climáticos de entrada no modelo, são necessários dados diários de temperatura máxima e mínima, velocidade média de vento, umidade relativa, radiação solar e precipitação. Os parâmetros necessários para cada estação podem ser visualizados na tabela 16.

Tabela 16 - Descrição dos parâmetros climáticos

(Continua)	
Nome do campo	Descrição
<b>Temperatura</b>	
TMPMX	Média máxima da temperatura do ar

Tabela 15 - Descrição dos parâmetros climáticos

(Conclusão)

Nome do campo	Descrição
TMPMN	Média mínima da temperatura do ar
TMPSTDMX	Desvio padrão máximo da temperatura máxima do ar
TMPSTDMN	Desvio padrão máximo da temperatura mínima do ar
<b>Precipitação</b>	
PCPMM	Precipitação média mensal
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação diária
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para precipitação
PR_W1	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia seco
PR_W2	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia úmido
PCPD	Número médio com dias de chuva em 1 mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de 30 minutos
RAIN_YRS	Número de anos utilizados para determinação de RAINHHMX
<b>Outros</b>	
SOLARAV	Radiação solar média por mês
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho
WINDAV	Velocidade média do vento

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As estatísticas relacionadas à temperatura, tais como TMPMX, TMPMN, TMPS, TDMXTMPS, TDMN foram alcançadas por meio de um *macro* do programa Microsoft Excel. Para o cálculo da temperatura no ponto de orvalho (DEWPT) foi utilizado um programa DEW.EXE, desenvolvido por Liersch (2003). As estatísticas relacionadas à precipitação: PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PR\_W1, PR\_W2, PCPD e RAINHHMX foram calculadas por meio do *software* pcpSTAT.EXE, também desenvolvido por Liersch (2003). Todos estes estão disponibilizados no site do SWAT. Os fundamentos dos cálculos matemáticos serão apresentados de forma detalhada neste ponto, pois os *softwares* e *macros*, tem esta base como funcionamento.

#### 4.3.4.1 Parâmetros Climáticos

A partir dos dados obtidos, obteve-se a média e o desvio mensal para todos os anos de acordo com a disponibilidade de dados de cada fator ambiental.

Para o cálculo das médias mensais anuais é utilizado a Equação 14.

$$X_{mom} = \frac{\sum x_{day,mon}}{yrs} \quad (14)$$

Onde:  $\sum X_{day,mon}$  é a somatória dos dados diários para cada mês de todos os anos, e  $y_{rs}$  é o número de anos de dados. Para o cálculo dos desvios mensais anuais utilizamos a equação 15:

$$\theta_{mon} = \sqrt{\frac{(\sum x_{day,mon} - x_{mon})^2}{(y_{rs}-1)}} \quad (15)$$

Onde:  $\sigma_{mon}$  é o desvio mensal de todos os anos.

#### 4.3.4.2 Temperatura no Ponto de Orvalho

Estimou-se a temperatura no ponto de orvalho – DEWPT, por meio dos dados de umidade relativa e temperatura do ar, pois a umidade relativa do ar (UR%) é dada pela relação entre a quantidade de vapor existente no ar e a que existiria se o mesmo estivesse saturado na mesma temperatura (Equação 16).

$$Ur(\%) = \frac{e_s}{e_a} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde,  $e_a$  representa a pressão exercida pela massa de vapor d'água existente na atmosfera, que pode variar de zero a um valor máximo chamado de pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ), o qual é dependente da temperatura do ar ( $T_{ar}$ ).

Para a estimativa do valor da pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) utiliza-se a Equação (17) conhecida como *Tetens*:

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left[\frac{7,5 \cdot t_{ar}}{237,3 + t_{ar}}\right]} \quad (17)$$

Assim, tendo encontrado os valores de  $e_a$  e  $e_s$ , calcula-se a temperatura de ponto de orvalho (DEWPT) através da equação 18.

$$DEWPT = \frac{\left[237,3 \log_{0,6108} \frac{e_a}{e_s}\right]}{\left[7,5 - \log_{0,6108} \frac{e_s}{e_a}\right]} \quad (18)$$

#### 4.3.4.3 Radiação Solar

Para a estimativa da energia solar incidente no solo considerando a atmosfera ausente - SOLARAV, calculou-se a declinação solar -  $\delta$  (equação19), o ângulo no pôr-do-sol -  $h_p$  (equação 20) e o ângulo zenital -  $Z$  (equação21), segundo Ometto (1981):

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (19)$$

Onde  $n$  é o dia juliano

$$h_p = -\arccos - (tg\psi . tg\delta) \quad (20)$$

Onde:  $\psi$  é a latitude local (para cada estação).

$$\cos z = \operatorname{sen}\psi . \operatorname{sen}\delta + \operatorname{cos}\psi . \operatorname{cosh} \quad (21)$$

Onde  $h$  é o ângulo horário ao meio dia ( $h=0^\circ$ ) e  $\operatorname{cosh}=1$ .

Assim, obtêm-se a radiação solar incidente (equação 22), pois:

$$SOLARAV = \frac{916,7}{R^2(\operatorname{sen}\psi . \operatorname{sen}\delta . h_p + \operatorname{cos}\psi . \operatorname{cos}\delta . \operatorname{sen}h_p)} \quad (22)$$

Onde  $R^2$  é o raio vetor Terra - Sol =  $(0,9915)^2 = 0,983$ .

#### 4.3.4.4 Estimativas de Precipitação

A estimativa da probabilidade dos dias de chuva seguido de dias de seca - PR\_W1, equação 23:

$$PR\_W1 = \frac{D_{CHV}/SC}{D_{n^0SC}} \quad (23)$$

Onde:  $D_{chv/sc}$  é o número dos dias de chuva seguido de dias sem chuva no mês, e  $D_{n°sc}$  é o número de dias sem chuva no mês.

Para a estimativa da probabilidade dos dias de chuva seguido de dias de chuva - PR\_W2, segue a relação na equação 24:

$$PR\_W2 = \frac{D_{CHV/CHV}}{D_{n°Chv}} \quad (24)$$

Onde:  $D_{chv/chv}$  é o número dos dias de chuva seguido de dias de chuva no mês, e  $D_{n°chv}$  é o número de dias com chuva no mês.

Para a estimativa da precipitação máxima de 0,5 horas no mês – RAINHHMX, usou-se a definição da precipitação máxima de 0,5 horas ou 30 minutos com recorrência de 2 anos, para isso, utilizou-se o método de Chow (1964), que demonstrou que a maioria das funções de frequência hidrológica podem ser calculadas pela equação 25.

$$P_{tr} = P_{max} + (K \cdot \theta_{pmax}) \quad (25)$$

Onde:  $P_{tr}$  é a precipitação máxima esperada para o período de retorno (2 anos),  $P_{max}$  é a média das precipitações máxima anuais,  $K$  é o fator de frequência e  $\sigma_{Pmax}$  é o desvio da média da precipitação máxima anual.

Os valores do fator de frequência ( $K$ ) são encontrados na tabela de Distribuição de Log Pearson Tipo III (tabela 17), em função do intervalo de recorrência em anos a ser utilizado e do coeficiente de assimetria para a precipitação máxima.

Tabela 17 - Valores de “K” em função do intervalo de recorrência utilizado e o coeficiente de assimetria (Skew)

	Recorrência de intervalos em anos					
	2	10	25	50	100	200
coeficienteSkew	Mudanças de percentagem					
(g)	50	10	4	2	1	0.5
3.0	-0.396	1 180	2 278	3 152	4 051	4 970

Tabela 17 - Valores de “K” em função do intervalo de recorrência utilizado e o coeficiente de assimetria (Skew)

(Continua)

(Conclusão)

coeficienteSkew (g)	Mudanças de percentagem					
2.5	-0.360	1 250	2 262	3 048	3 845	4 652
2.0	-0.307	1 302	2 219	2 912	3 605	4 298
1.8	-0.282	1 318	2 193	2 848	3 499	4 147
1.6	-0.254	1 329	2 163	2 780	3 388	3 990
1.4	-0.225	1 337	2 128	2 706	3 271	3 828
1.2	-0.195	1 340	2 087	2 626	3 149	3 661
1.0	-0.164	1 340	2 043	2 542	3 022	3 489
0.9	-0.148	1 339	2 018	2 498	2 957	3 401
0.8	-0.132	1 336	1 993	2 453	2 891	3 312
0.7	-0.116	1 333	1 967	2 407	2 824	3 223
0.6	-0.099	1 328	1 939	2 359	2 755	3 132
0.5	0.083	1 323	1 910	2 311	2 686	3 041
0.4	-0.066	1 317	1 880	2 261	2 615	2 949
0.3	0.050	1 309	1 849	2 211	2 544	2 856
0.2	-0.033	1 301	1 818	2 159	2 472	2 763
0.1	-0.017	1 292	1 785	2 107	2 400	2 670
0	0	1 282	1 751	2 054	2 326	2 576
-0.1	0.017	1 270	1 716	2 000	2 252	2 482
-0.2	0.033	1 258	1 680	1 945	2 178	2 388
-0.3	0.050	1 245	1 643	1 890	2 104	2 294
-0.4	0.066	1 231	1 606	1 834	2 029	2 201
-0.5	0.083	1 216	1 567	1 777	1 955	2 108
-0.6	0.099	1 200	1 528	1 720	1 880	2 016
-0.7	0.116	1 183	1 488	1 663	1 806	1 926
-0.8	0.132	1 166	1 448	1 606	1 733	1 837
-0.9	0.148	1 147	1 407	1 549	1 660	1 749
-1.0	0.164	1 128	1 366	1 492	1 588	1 664
-1.2	0.195	1 086	1 282	1 379	1 449	1 501
-1.4	0.225	1 041	1 198	1 270	1 318	1 351
-1.6	0.254	0.994	1 116	1 166	1 197	1 216
-1.8	0.282	0.945	1 035	1 069	1 087	1 097
-2.0	0.307	0.895	0.959	0.980	0.990	0.995
-2.5	0.360	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800
-3.0	0.396	0.660	0.666	0.666	0.667	0.667

Fonte: Chow (1964).

Inicialmente, calcula-se o coeficiente de assimetria - Skew para a precipitação máxima – PCPSKW, equação 26.

$$PCPSKW = \frac{n \sum (P_{day,mon} - P_{mon})^3}{(n-1)(n-2) \cdot \sigma_{P_{mon}}} \quad (26)$$

Onde:  $n$  é o número total de dias de precipitação no mês,  $P_{day,mon}$  é a precipitação média no mês,  $P_{mon}$  é a precipitação média anual e  $\sigma_{P_{mon}}$  é o desvio médio da precipitação anual.

Segundo Assad et al. (1992), após a determinação dos valores extremos, utilizando o método proposto por Torrico (1975), calcula-se as precipitações máximas para 24 horas, para uma hora e para trinta minutos.

José Jaime Taborga Torrico criou o método das isozonas, baseado no trabalho de Pfaffstetter (1957), construindo um mapa de Isozonas (Figura 14), em que relaciona a precipitação máxima anual de uma hora, com a máxima anual de 24 horas para cada posto pluviográfico existente no Brasil.

Para transformar precipitações máximas diárias ( $P_{1dia}$ ) para o tempo de recorrência desejado em precipitação horária ( $P_{24h}$ ), aplica-se o Método de Taborga, equação 27.

$$P_{24h} = 1,095 \cdot P_{1dia} \quad (27)$$

Pelo Método de Taborga, as precipitações para 24 horas guardam uma relação constante e independente do período de retorno, de 1,095 com a precipitação máxima diária, pois segundo Torrico (1975):

[...] o tempo de recorrência nesta relação não tem influência, porque a precipitação média de um dia equivale a uma duração de quinze horas e 50 minutos para tempo de recorrência de um ano, e a 16 horas e 10 minutos para 1000 anos, ou seja, somente 0,1% de influência nas alturas de precipitação.

Assim, identifica-se no mapa (Figura 14) a isozona correspondente, que para as estações utilizadas neste estudo situam-se nas isozonas D, E e F, com isso obtém-se o coeficiente para a transformação da precipitação máxima de 24 horas em precipitação para 1 hora e para 0,06 hora (6 minutos), multiplicando a  $P_{24h}$  pelo coeficiente de Taborga tabelado para as isozonas de igual relação, disposto na tabela 18.

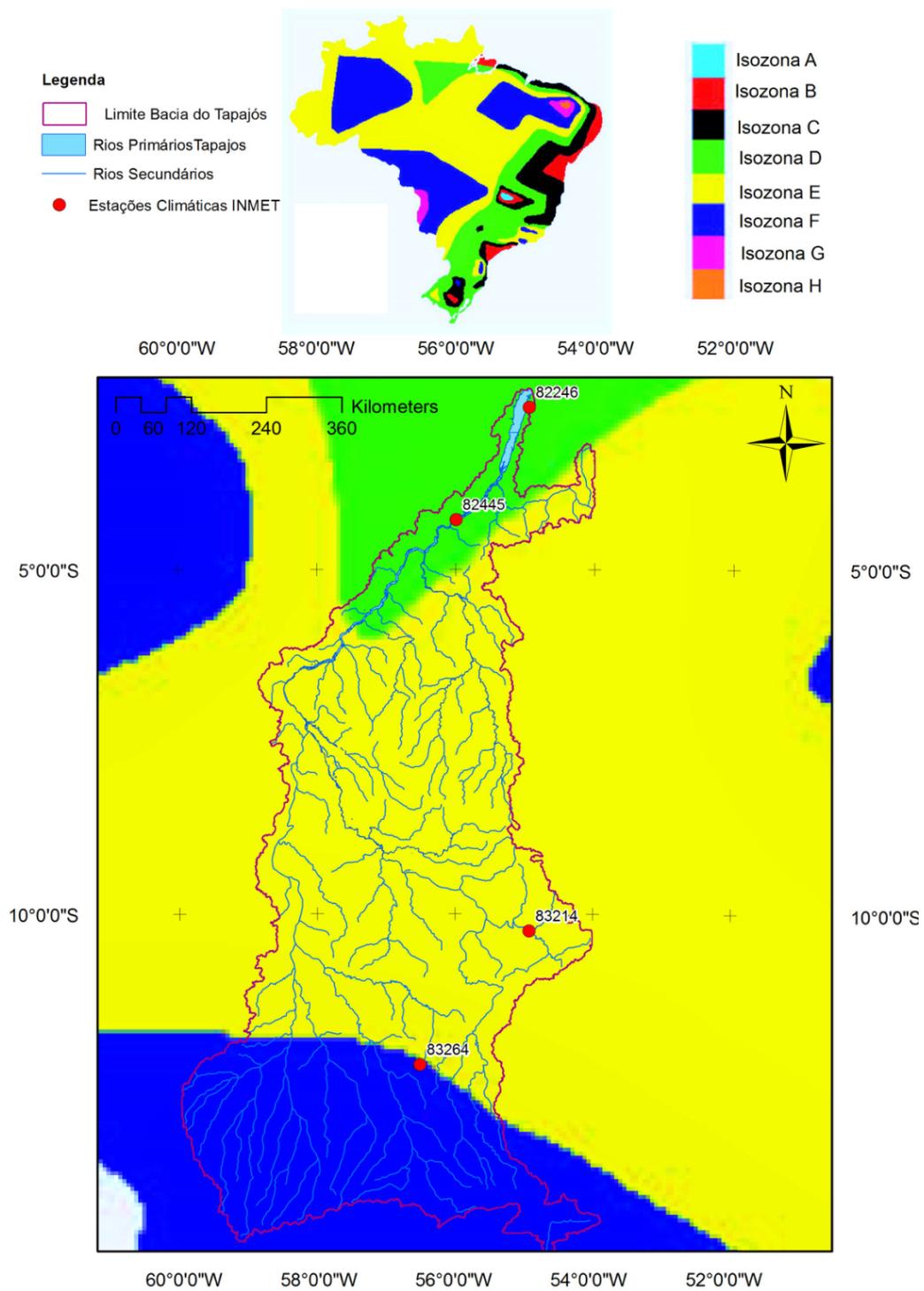


Figura 14 - Mapa das isozonas de igual relação  
 Fonte: Adaptado de Simões (2000).

Tabela 18 - Correções para as isozonas de igual relação

Zona	1 h / 24 hs										6 mim/24	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1000	10000	5-50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35	34,7	33,6	32,5	7	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,6	35,4	34,3	8,4	7,5
C	40,1	39,5	39,5	39,3	39,1	39,1	38,8	38,4	37,2	36	9,8	8,8
D	42	41,4	41,4	41,2	41,1	41	40,7	40,3	39	37,8	11,2	10
E	44	43,6	43,3	43,2	43	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Torrico (1974).

#### 4.3.4.5 Origens das Entradas Climáticas

Segundo Pontes; Fernandes (2002), para a obtenção de resultados do processo de simulação satisfatórios as escolhas das estações devem ter séries de dados pluviométricos superior a 10 anos, exigência também do modelo. Duas origens de entradas de dados foram usadas:

##### 4.3.4.5.1 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Adotando como critérios os propostos por Ponte; Fernandes (2002), quatro estações climatológicas do INMET foram usadas, conforme descritas na tabela 19; a localização delas pode ser vista na figura 15.

Tabela 19 - Estações Climáticas

Nome	Código	Latitude	Longitude	Altimetria
Belterra - PA	82246	-2.63	-54.95	175.74
Itaituba - PA	82445	-4.28	-55.98	45
Matuba - MT	83214	-10.25	-54.91	285
Gleba Celeste - MT	83264	-12.28	-55.29	415

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para as estações climáticas de Itaituba, Belterra, Matuba e Gleba Celeste os seguintes parâmetros estão disponíveis: a temperatura (°C), precipitação (mm), velocidade do vento

(m/s), umidade Relativa (fração).

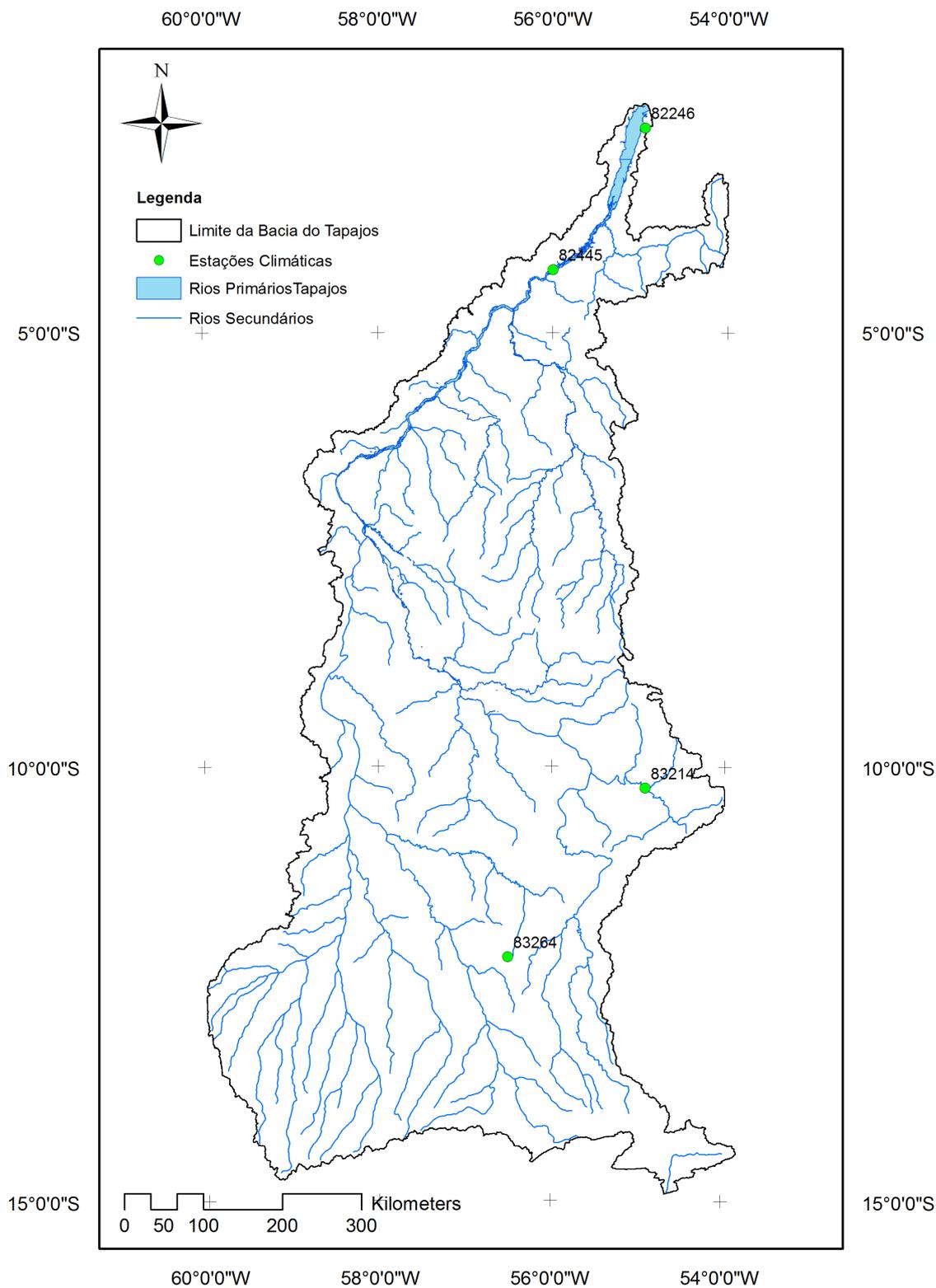


Figura 15 - Localização das estações climática  
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

#### 4.3.4.5.2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP)

Foram criadas quatro estações virtuais nas mesmas latitudes e longitudes das existentes no INMET, para a criação dos dados da base de dados do GPCP. Foram seguidas as mesmas metodologias propostas por Malutta (2012) e Souza (2015). O GPCP possui dados climáticos deste 1974 até 2014, com os seguintes parâmetros disponíveis à temperatura (°C), precipitação (mm), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa (fração).

#### 4.3.5 Dados Fluviométricos (Vazões dos Rios)

Dados de vazão foram obtidos através do site *Hidroweb*, um servidor da Agência Nacional de Águas (ANA). Utilizaram-se dados de 3 estações pluviométricas (Tabela 20) por possuírem a série temporal 01/01/2000 a 31/12/2002 e de 01/01/2007 a 31/12/2008 e ainda por estarem localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Tapajós.

Tabela 20 - Estações fluviométricas, códigos oficiais das estações

<b>Estação</b>	<b>Nome da Estação</b>	<b>Operador</b>
17650002	Acará dos Tapajós	Eletronorte
17675000	Jardim do Ouro	Eletronorte
17300000	Fazenda Tratex	Eletronorte

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As estações aptas a serem empregadas no estudo hidrológico são as estações Acará dos Tapajós (17650002), Fazenda Tratex (17300000) e Jardim do Ouro (17675000), as quais podem ser visualizadas na figura 16.

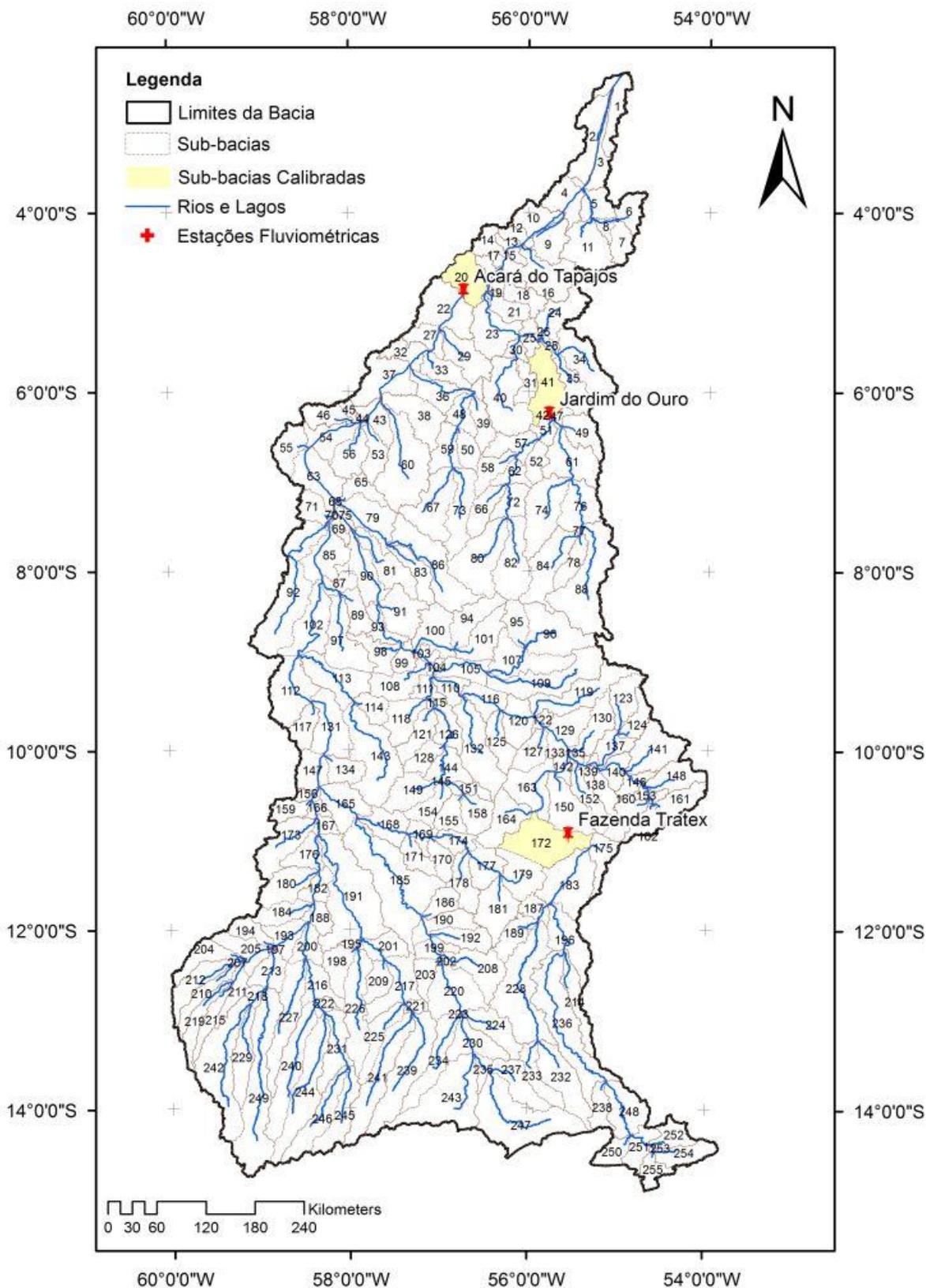


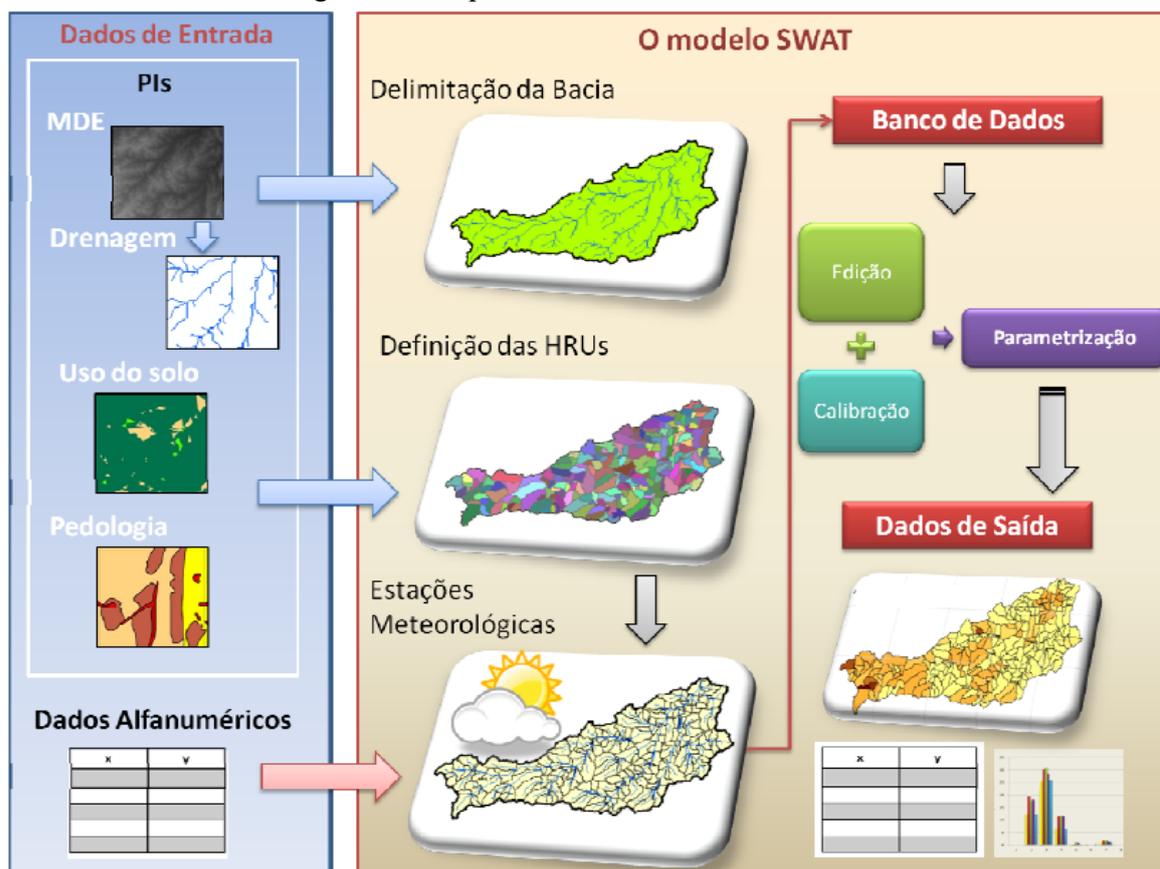
Figura 16 - Localização das estações fluviométricas (Vazões)  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.4 PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT

A utilização do SWAT foi feita através da sua interface com o ArcGIS® 10.1 *Student*, com a ferramenta ArcSWAT. O processo se inicia com a preparação dos dados geoespaciais (Pedologia, Uso e ocupação do solo e MDT) e do banco de dados climatológico, os dados de entrada do modelo foram descritos anteriormente.

A inserção dos planos de informação cartográficos e dos dados alfanuméricos no modelo SWAT ocorreram via interface interna do próprio ArcSWAT. A partir da inserção do MDE se obtém a rede de drenagem e é possível realizar a delimitação e discretização da bacia em sub-bacias. Já a sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), estas por sua vez, possuem uma única combinação dos mapas e classes supracitados. No modelo SWAT um processo só poderá ser executado se o seu antecessor for realizado com sucesso, o processo de funcionamento do modelo pode ser visto na Figura 17.

Figura 17: Esquema de funcionamento do SWAT



Fonte: Taveira (2012).

#### 4.4.1 Delimitação e discretização da bacia

A delimitação da bacia hidrográfica do rio Tapajós foi realizada através da interface ArcSWAT a partir da inserção do MDE. Neste trabalho foi utilizada a opção máscara que restringe a área máxima em que a ferramenta delimitará uma bacia. O modelo gera a rede de canais hídricos e a partir da definição pelo usuário do ponto de exutório a bacia é delimitada.

A área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal é definida pelo usuário, este parâmetro define a quantidade de sub-bacias no processo de discretização. Jha et al. (2004) ressaltam que há uma sensibilidade do modelo à discretização da bacia hidrográfica, de modo que, uma maior quantidade de sub-bacias resulta em uma maior eficiência do modelo. Desta forma, foi utilizado para a formação das sub-bacias o valor correspondente a 5% da área da bacia, delimitada pelo modelo para a área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal.

No processo de discretização em sub-bacias, o modelo de SWAT insere de forma automática os pontos de confluência da rede hidrográfica que são os exutórios das sub-bacias, desse modo, a cada sub-bacia é associada um curso de água.

#### 4.4.2 Unidades de Resposta Hidrológica

A sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), estas, possuem uma única combinação dos mapas e classes supracitados. No modelo SWAT há a possibilidade de escolher como se dará a distribuição das URHs nas sub-bacias como mostra a Figura 18.

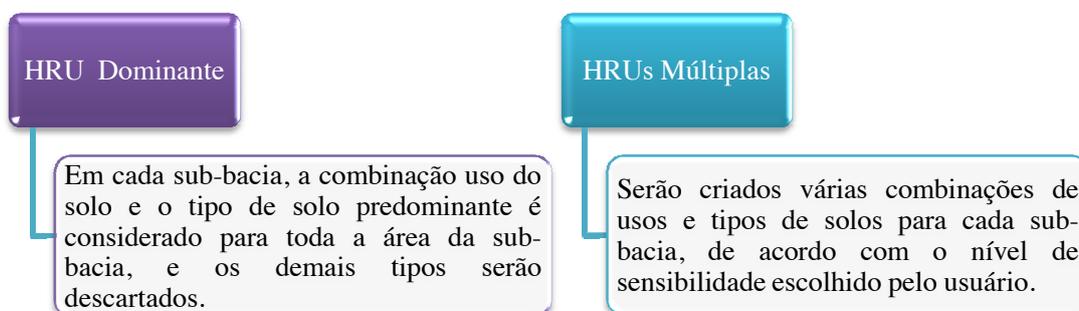


Figura 18: Alternativas de definição de URH's  
Fonte: Taveira (2012).

Neste trabalho, a opção de múltiplas URHs foi escolhida com o intuito de evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo e aos tipos de solos para as sub-bacias. Desta forma, estabeleceu-se como 3% da área da sub-bacia o limite mínimo da área para o uso da terra, solo e declividade para a formação das URHs. Foram utilizados 3 intervalos de declividade, são elas: 0 a 3%, 4% a 20% e acima de 20%.

#### **4.4.3 Período de aquecimento do modelo**

O período de aquecimento tem a finalidade de estabilizar o modelo durante seus processos interativos iniciais para a obtenção dos resultados. As incertezas no resultado do modelo, nas condições iniciais, são minimizadas através da utilização desse período que permite reduzir os eventuais erros nessas condições (WAGENER et al., 2004). Neste trabalho foi adotado um período de aquecimento para o modelo de 20 anos, o qual varia de 01/01/1979 a 01/01/1999.

#### **4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SWAT**

Modelos distribuídos de bacias hidrográficas estão sendo cada vez mais utilizados para apoiar decisões sobre alternativas estratégicas na gestão das bacias hidrográficas, pois abrangem as mudança do uso e ocupação do solo, alterações climáticas, alocação de água e controle da poluição hídrica, entretanto, a qualidade destes resultados são dependentes da calibração dos parâmetros desses modelos, estando condicionada à natureza das suas incertezas.

A calibração de um modelo hidrológico é um meio de se ajustar os parâmetros empíricos do modelo para que melhor representem o comportamento hidrológico do sistema (COLLISHONN, 2001). Para Sammons; Neitsch (2000), a calibração é uma ferramenta que permite ao usuário editar o desempenho global a partir da parametrização das variáveis do modelo.

Neste estudo as calibrações foram realizadas tomando como base três estações: Acará dos Tapajós (17650002), Fazenda Tratex (17300000) e Jardim do Ouro (17675000), no período de 01/01/2001 a 31/12/2001, e as validações de 01/01/2002 a 31/12/2002

#### 4.5.1 SWAT-CUP

Para a calibração do modelo SWAT aplicado à bacia do Rio Tapajós, foi utilizado o software SWAT-CUP, versão 2016 – 5.1.6.2. Inicialmente, o SWAT-CUP leu os arquivos de entrada e saída do SWAT através dos arquivos “TexInOut”, resultado da modelagem do ArcSWAT.

Os objetivos do SWAT-CUP são: (i) integrar diversas calibrações e análises de procedimentos de incertezas para SWAT em uma interface de fácil manuseio aos usuários; (ii) fornecer uma maneira mais rápida para fazer as operações demoradas da calibração; (iii) padronizar as etapas de calibração; (iv) adicionar funcionalidades para as operações de calibração, tal como a criação de resultados gráficos, comparação dos dados calibrados etc. (ABBASPOUR, 2013).

A técnica escolhida para calibração foi o método *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2). Benveniste; Freer (2001) em seus estudos, citam que o SUFI-2 é uma técnica de análise de incerteza baseada na amostragem dos parâmetros que são os responsáveis por todas as fontes de incerteza, ou seja, incerteza estrutural, incerteza dos parâmetros e incerteza de resposta, porque o valor da medida de probabilidade é associado a um conjunto de parâmetros que refletem todas essas fontes de erro e quaisquer efeitos da covariação dos valores dos parâmetros de desempenho do modelo.

Yang (2008) comenta que o SUFI-2 representa a incerteza de todas as pesquisas que envolvem os parâmetros de incertezas em modelos hidrológicos. No SUFI-2, o parâmetro de incerteza é descrito com uma variedade na distribuição uniforme do parâmetro *hypercube*. A amostragem por *Latinhypercube* (LH) é utilizada para traçar o parâmetro independente e fixo (ABBASPOUR et al., 2007).

#### 4.5.2 Análise de Sensibilidade

Para a modelagem hidrológica, a análise de sensibilidade é uma ferramenta importante, na previsão dos parâmetros mais significativos das simulações hidrológicas, sedimentologias e de qualidade de água.

No SWAT-CUP, a ferramenta *Sensitivity Analysis* tem o intuito de identificar quais os parâmetros que são mais sensíveis ou que mais afetam a variável que se deseja calibrar no modelo (NEITSCH et al., 2005). A análise de sensibilidade do SWAT utiliza dois métodos, o *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor-At-a-Time* (OAT).

O método LH é uma forma sofisticada de se realizar uma amostragem aleatória como o Método de Monte Carlo, permitindo uma análise mais robusta na sensibilidade, que requer um elevado número de simulações e, conseqüentemente, uma exigência computacional elevada (tempo e memória de disco) (GRIENSVEN, 2005). Mesmo que o método seja baseado na simulação de Monte Carlo, utiliza-se uma amostragem estratificada que permite uma estimativa eficiente nos parâmetros de saída. O LH subdivide a distribuição de cada parâmetro em N intervalos, cada um com probabilidade de ocorrência igual a 1/N. Valores aleatórios são gerados de forma que cada faixa seja mostrada apenas uma vez. O modelo é então executado N vezes com as combinações aleatórias dos parâmetros. Os resultados do modelo são tipicamente analisados com regressão multivariada linear e métodos estatísticos de correlação (GRIENSVEN, 2005).

O método *One-Factor-At-a-Time* foi proposto por Morris (1991) e é um exemplo de método de integração de sensibilidade do local para o global. No OAT apenas os parâmetros empíricos relacionados a entrada são modificados durante os *loopings* que o modelo realiza na análise. Em cada *loop* realizado pelo modelo, apenas um parâmetro é alterado por vez, assim, com as mudanças no resultado em cada *loop*, o modelo pode encontrar a solução para as ambigüidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado (GRIENSVEN, 2005).

Essa combinação dos métodos LH-OAT na análise de sensibilidade do modelo SWAT-CUP, proporciona a robustez do LH e assegura a precisão na solução de ambigüidade do OAT, tornando a análise mais eficiente e confiável (SILVA, 2013).

A mudança na saída do modelo pode ser ambigüamente atribuída aos parâmetros modificados pela média elementar parcial do  $S_{i,j}$  conforme equação 28:

$$S_{i,j} = \frac{(SSE(\phi_1, \dots, \phi_i x(1+f), \dots, \phi_p) - SSE(\phi_1, \dots, \phi_i, \dots, \phi_p))}{f} \quad (28)$$

Onde:  $S_{i,j}$  = efeito parcial do parâmetro  $\phi_1$  ao redor do LH do ponto j;  $f$  = fração que o parâmetro  $\phi_1$  é alterado (predefinição constante); SSE = somatório do erro quadrático.

O somatório do erro quadrático (SSE) é utilizado como função objetiva na análise de sensibilidade do modelo SWAT, e é definido por:

$$SEE = \sum_{i=1}^N (x_{obs} - x_{sim})^2 \quad (29)$$

Onde: SSE = somatório do erro quadrático;  $x_{obs}$  = evento observado;  $x_{sim}$  = evento simulado.

Na execução do modelo, os parâmetros empíricos são aleatoriamente aumentados ou diminuídos com a fração de  $f$ , sendo considerado o parâmetro  $\phi_i$ . A performance do fator  $\phi_i$  envolve  $\phi_i + 1$ , obtendo o parcial efeito de cada parâmetro em um *loop*. O efeito final será estimado pela média do conjunto de “ $m$ ” efeitos parciais. O resultado final é fornecido por meio de um *ranking*, o modelo estima o alcance por meio de  $m(\phi_i + 1)$  para cada *loop* na simulação (GRIENSVEN, 2005).

Neste trabalho, após a finalização das simulações, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros simulados. O processo se inicia com levantamento dos parâmetros associados à vazão, para isso foram encontrados 30 parâmetros, apresentados na Tabela 21, propostos por Arnold (2011). Para o presente estudo foram realizadas 1000 interações para a análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos, conforme recomendação descrita no manual de utilização SWAT-CUP.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade

(Continua)

Produção de Água e de Sedimentos		
1	ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
2	CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
3	CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal
4	CANMX	Máximo de armazenamento do dossel
5	SLOPE	Declividade média da sub-bacia
6	CN2	Número da curva na condição II de umidade
7	ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
8	GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo das águas subterrâneas
9	GWQMN	Água do aquífero profundo que retorna ao canal
10	GW_REVAP	Coefficiente de retorno da água do aquífero raso para a zona radicular
11	BIOMIX	Eficiência de revolvimento biológico
12	EPCO	Fator de compensação de águas pela planta
13	REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o revap ou percolação para o aquífero profundo
14	SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da bacia
15	SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado
16	SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
17	SOL_Z	Profundidade de solo (mm)

Tabela 22 - Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade

(Conclusão)

<b>Produção de Água e de Sedimentos</b>		
18	SOL_ALB	Albedo de solo úmido (decimal)
19	SURLAG	Coefficiente de retardo do escoamento superficial
20	BLAI	Máximo índice de área foliar potencial
21	CH_N1	Coefficiente de Rugosidade de Manning
22	ALFA_BKN	Constante de recessão do escoamento de base 2
23	OV_N	Valor de Manning para o escoamento superficial
24	RCHRG	Coefficiente de percolação de água no aquífero profundo
25	SFTMP	Temperatura de precipitação de neve
26	SMFMN	Fator de derretimento de neve em 21 de dezembro
27	SMTMX	Fator de derretimento de neve em 21 de junho
28	SMTMP	Temperatura de derretimento de neve
29	TIMP	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve
30	TLAPS	Gradiente de temperatura

Fonte: Arnold et al. (2011).

Escolhidos os parâmetros de calibração, os intervalos nos quais estes se aplicavam foram delimitados, de acordo com os valores máximos e mínimos permitidos pelo SWAT.

Os dados monitorados foram adicionados ao SWAT-CUP, assim como o tempo de modelagem e anos utilizados para “aquecer o programa”. Uma vez alimentado o banco de dados, acionou-se a ferramenta “*Calibrate*” e em seguida foi escolhido a opção “*Execute all*” na janela “*Execute Calibration*”.

Na análise de sensibilidade realizada pelo SWAT foram identificados quais parâmetros influenciam na modelagem para vazão, dos 30 parâmetros avaliados, 25 devem ser levados em consideração: BLAI, ESCO, SOL\_AWC, CANMX, CN2, SOL\_K, GWQMN, SLOPE, CH\_K2, SOL\_Z, GW\_REVAP, ALPHA\_BF, REVAPMN, CH\_N2, EPCO, GW\_DELAY, BIOMIX, SOL\_ALB, SURLAG, SLSUBBSN, CH\_N1, ALFA\_BKN, OV\_N, RCHRG e TLAPS. Os parâmetros SFTMP, SMFMN, SMFMX, SMTMP e TIMP não apresentaram sensibilidade alguma no que se refere à produção de água, pois estão ligados diretamente à produção e derretimento de neve.

#### 4.5.3 Estatísticas dos resultados

Para avaliar o desempenho do modelo devem ser realizadas análises estatísticas para comparar dados observados com dados simulados. Estas análises são de extrema importância, pois é uma forma de verificar a eficiência da simulação. Neste trabalho, foram utilizadas duas

ferramentas estatísticas do índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) (Nash & Sutcliffe, 1970) e da porcentagem BIAS (PBIAS).

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 30) foi utilizado com a finalidade de avaliar a eficiência do modelo em simular determinada variável. O COE pode variar a partir de  $-\infty$  a 1, sendo 1 indicativo de um perfeito ajuste dos dados simulados em relação aos dados medidos:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_m^{obs})^2} \quad (30)$$

Onde:

$Y^{obs}$  : é o evento observado;

$Y^{sim}$  : é o evento simulado;

$Y_m^{obs}$  : é a média do evento observado no período de simulação e;

n: é o número de eventos.

A porcentagem BIAS (equação 31) avalia a tendência geral que os dados simulados mostram em subestimar (valores PBIAS positivos) ou superestimar (valores PBIAS negativos) os dados medidos (GUPTA et al., 1999):

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \quad (31)$$

Em que: PBIAS é o desvio dos valores simulados ( $Y^{sim}$ ) em relação aos valores medidos  $Y^{obs}$  expresso em porcentagem.

Onde:

N: número de eventos;

$Y_{obs}$ : Evento Monitorado e;

$Y_{sim}$ : Evento Simulado.

Foram utilizadas as recomendações de Moriasi et al. (2007), que classifica o desempenho, por índice de eficiência estatística para modelagem de SWAT, conforme tabela 22. Estes índices foram calculados tanto para os resultados das simulações calibradas, como os resultados das simulações não calibradas.

Tabela 22 - Desempenho dos valores de COE e PBIAS

Índice de eficiência Estatística	Resultados estatísticos de COE	Resultados estatísticos de PBIAS
Muito Bom	$0.75 < COE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0.60 < COE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0.50 < COE \leq 0.60$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$COE \leq 0.50$	$PBIAS < \pm 25$

Fonte: adaptado de Moriasi et al. (2007)

#### 4.6 COMBINAÇÕES ENTRE AS ENTRADAS PEDOLÓGICA E CLIMÁTICAS

As simulações foram realizadas partindo das diferentes entradas pedológicas (EMBRAPA e FAO) combinadas com as diferentes entradas climáticas (INMET e GPCP), após isso foram confrontados os dados e simulados com os observados através do índice de COE, a figura 19, mostra as diferentes combinações.

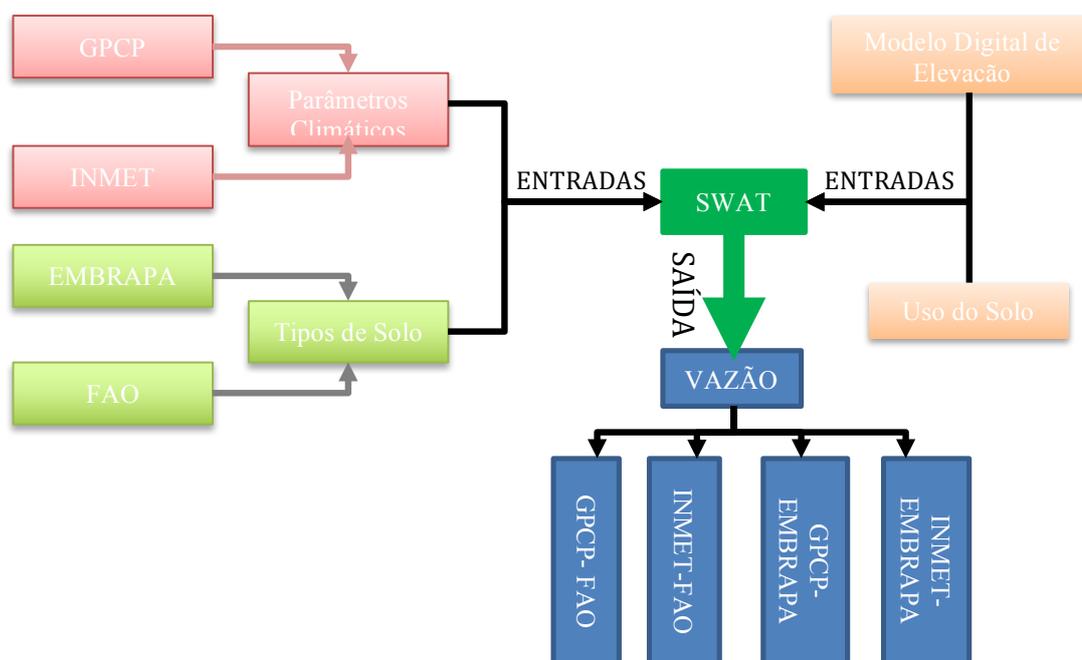


Figura 19: Fluxo das diferentes entradas de dados  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.7 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

O modelo SWAT permite que diferentes processos físicos na bacia sejam simulados, dentre os quais: analisar os impactos das alterações ocorridas na bacia sobre o escoamento, a produção de sedimentos, qualidade da água e as vazões (NEISTCH et al.2005).

Como um dos objetivos do trabalho foi avaliar se o modelo de SWAT após os processos de parametrização e calibração ainda mantinha os índices estatísticos aceitáveis, manteve-se constante a parametrização encontrada, bem como as entradas pedológicas e climáticas que apresentaram melhores índices estatísticos. Neste sentido, adotou-se como cenário as modificações do uso do solo que ocorreram em 2007. Na figura 20 está ilustrada a comparação gráfica entre as variações de uso e ocupação do solo no ano 2001 e em 2007, já na figura 21 há a distribuição espacial do uso e ocupação do solo do ano de 2007. Os resultados obtidos nesta simulação foram confrontados com as vazões observadas, isso na busca de se confirmar se o modelo de SWAT é capaz realmente de predizer um cenário, com modificações de uso e ocupação do solo. No período de 2001 para 2007, constatou-se uma perda de 6,69% de floresta e um aumento de área agrícolas de 4,13%.

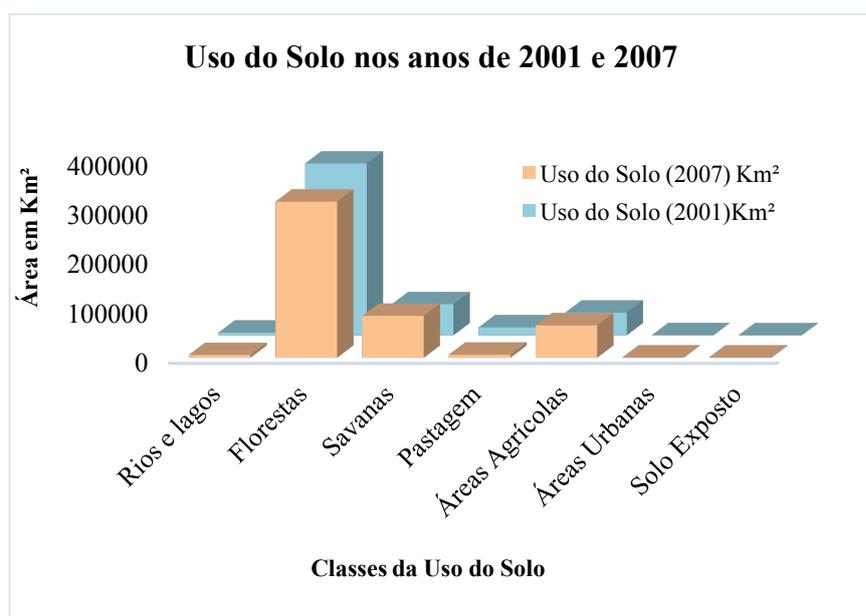


Figura 20 - Comparação gráfica entre as alterações de uso e ocupação do solo nos anos de 2001 e 2007  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

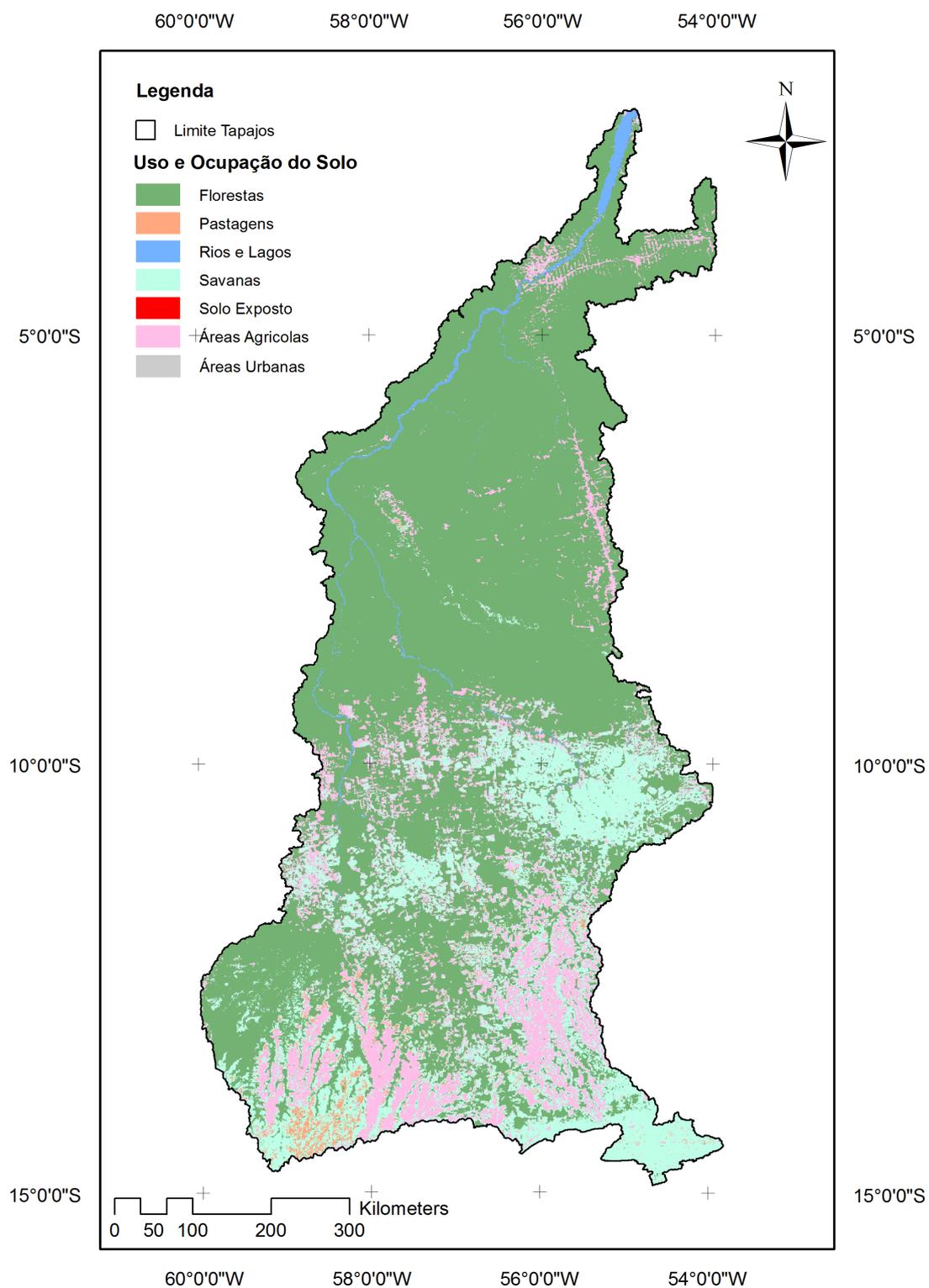


Figura 21 - Uso e ocupação do Solo na bacia do rio Tapajós para o ano de 2007  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 PLANOS DE INFORMAÇÕES

#### 5.1.1 Modelo Numérico do Terreno (MNT)

O MNT obtido na Bacia do Rio Tapajós mostra que suas altitudes chegam a 893 metros nas cabeceiras, decrescendo para 100 metros na sua foz, com uma média de 312 metros, conforme pode ser visualizado na figura 22. Quanto ao relevo, constitui-se numa região extremamente aplainada, com predomínio de superfícies aplainadas e depressões, seguidas de planícies aluviais. Recortando essas superfícies surgem relevos residuais altos, planaltos e planaltos rebaixados.

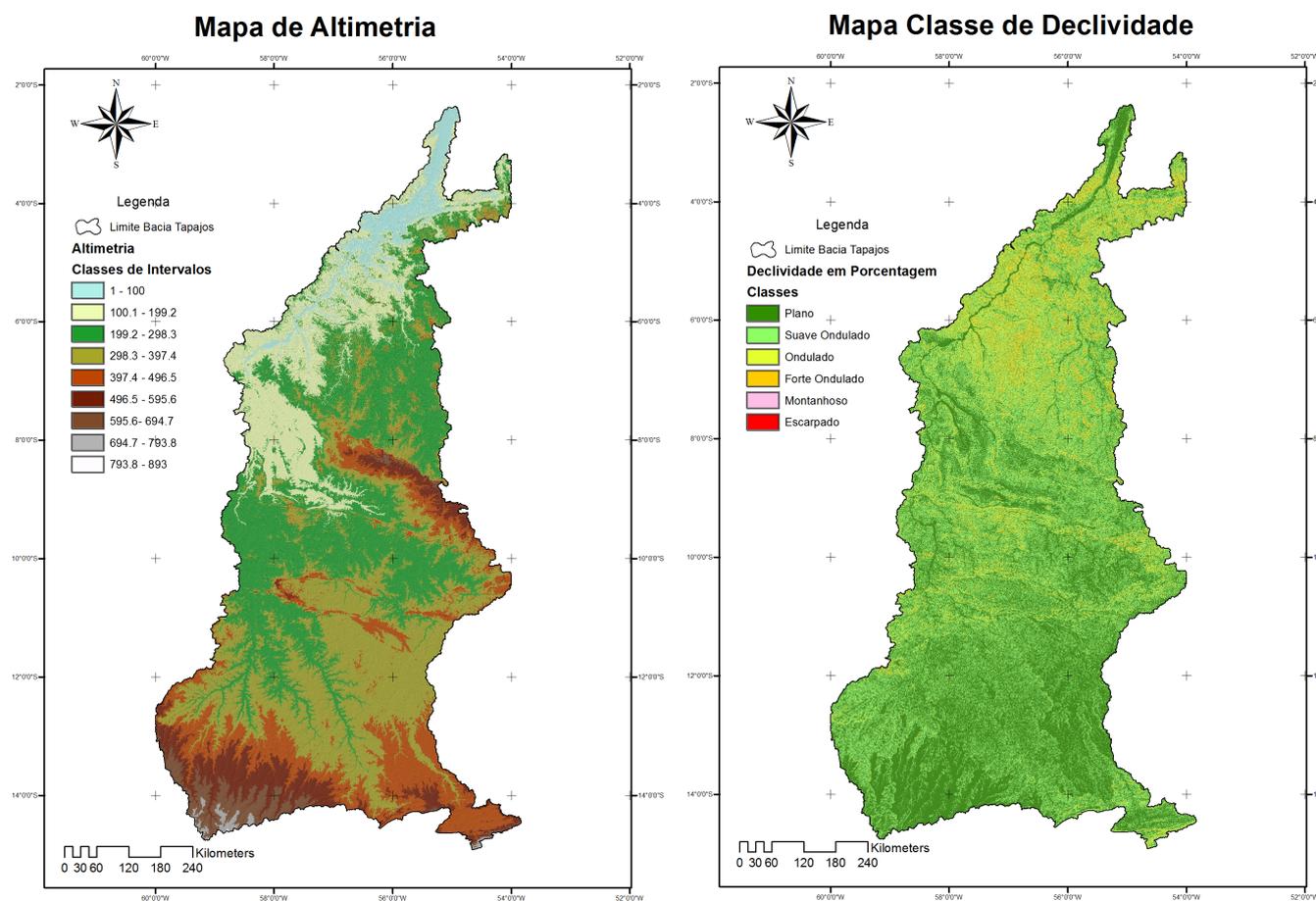


Figura 22 - Mapa de altimetria e mapa de declividade  
 Fonte Elaborado pelo autor (2017).

### 5.1.2 Uso e Ocupação do Solo

A bacia hidrográfica do rio Tapajós foi classificada com seis classes de uso e ocupação do solo, sendo que a classe predominante encontrada para a área de estudo foi a classe de floresta, com aproximadamente 72,84% da área de toda a bacia hidrográfica, seguida da classe savanas com 13,16% e áreas agrícolas com 9,56%, como descrito na Tabela 23 e ilustrado na Figura 23. As formações de regiões com savanas ocupam cerca de 13% do Estado do Mato Grosso, estendendo-se para a porção sul e sudoeste do Planalto Parecis, na chapada dos Guimarães, na depressão Cuiabana, no planalto Taquari/alto Araguaia, nas depressões do alto Paraguai-Guaporé, nas planícies e pantanal mato-grossense.

Tabela 23 - Distribuição das classes uso e ocupação do solo

<b>Uso do Solo</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentagem</b>
Rios e Lagos	5224,07	1,10%
Florestas	346700,09	72,84%
Savanas	62626,44	13,16%
Pastagem	15763,679	3,31%
Áreas Agrícolas	45510,81	9,56%
Áreas Urbanas	120,61	0,03%
Solo Exposto	37,59	0,01%

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

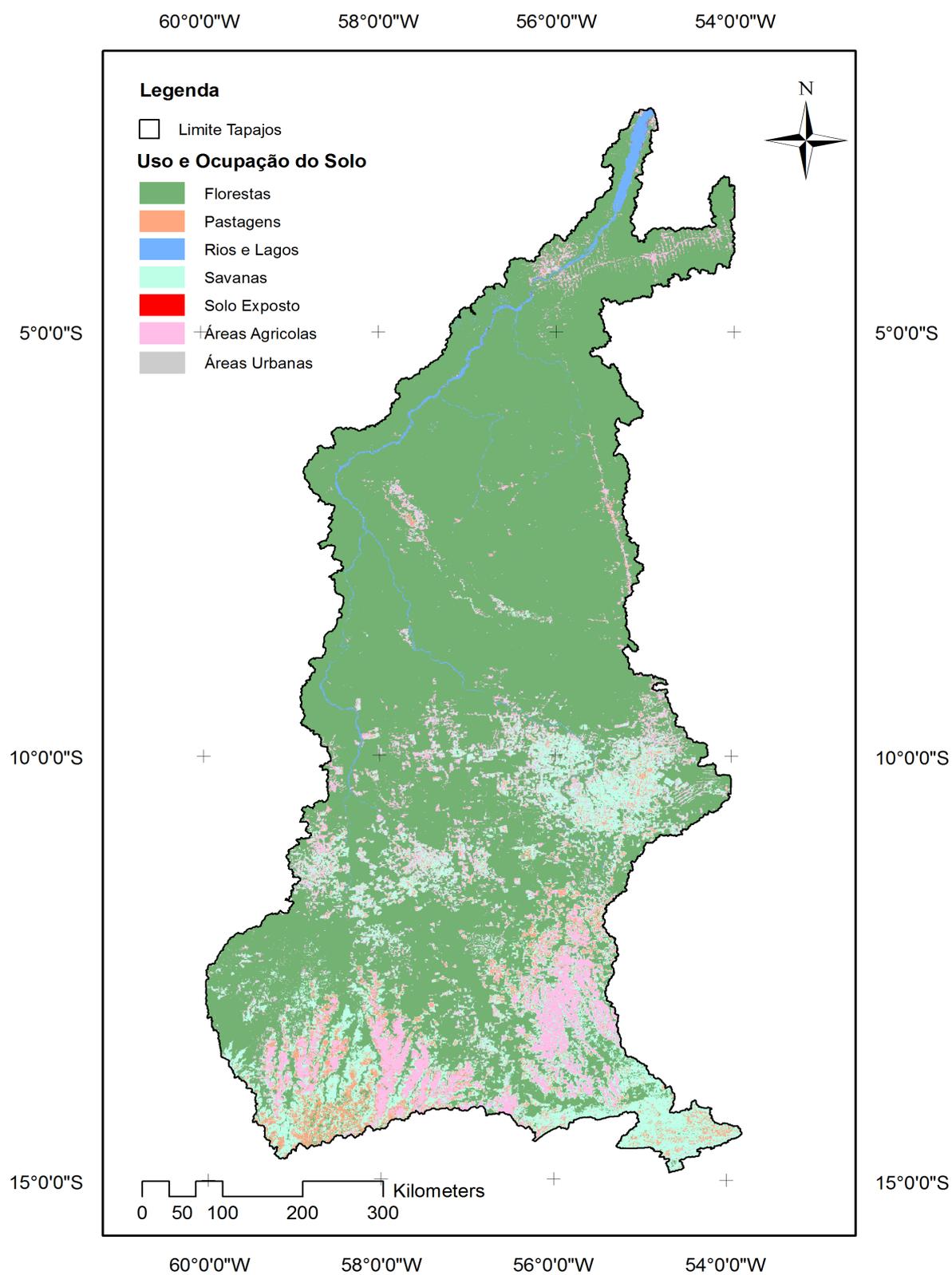


Figura 23 - Mapa da distribuição do uso e ocupação do Solo na bacia do rio Tapajós para o ano de 2001  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 5.2 DEFINIÇÃO DAS SUB-BACIAS E CURSOS DE ÁGUA

Com relação à área de drenagem da Bacia do Rio Tapajós, o SWAT estimou em 475983,31 km<sup>2</sup> sua área de abrangência, subdividindo-a em 255 sub-bacias. Arnold et al. (1998) esclarecem que a correta delimitação das sub-bacias de um projeto possibilita extrair melhores resultados a partir da criação dos URHs, pela junção dos mapas de solo, declividade e cobertura do solo. Sub-bacias minúsculas podem mascarar resultados e comprometer o bom funcionamento do modelo. Nesse projeto, foram criados 2.807 URHs, possibilitando com isso analisar as áreas de forma mais detalhada. Quanto aos exutórios, que são os pontos que definem o final de cada sub-bacia, três deles foram definidos a partir dos pontos fluviométricos inseridos manualmente no modelo, para que fosse possível realizar a comparação das vazões observadas e simuladas; estes pontos já foram apresentados na figura 16.

## 5.3 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM INICIAL

No âmbito da hidrologia, diversas variáveis referentes a qualidade de água são dependentes da vazão, tais como, sedimentação, concentração de nutrientes e pesticidas. Por esta razão, em processos de simulação ambiental hidrológicas, esta é a primeira coisa a ser avaliada (GRIENSVEN, 2006; MORIASI, 2007; SHANTHI, 2001).

Após as primeiras simulações com SWAT, os dados gerados pelo modelo foram confrontados com os observados, neste conjunto de simulações, os valores do índice COE e PBIAS, estão expostos nas figuras 24 e 25 respectivamente; para as estações fluviométricas de Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, onde foram usados os seguinte dados de entradas INMET-EMBRAPA, GPCP-EMBRAPA, GPCP-FAO e INMET-FAO, os valores de referência para COE e PBIAS, foram descritos anteriormente na tabela 22.



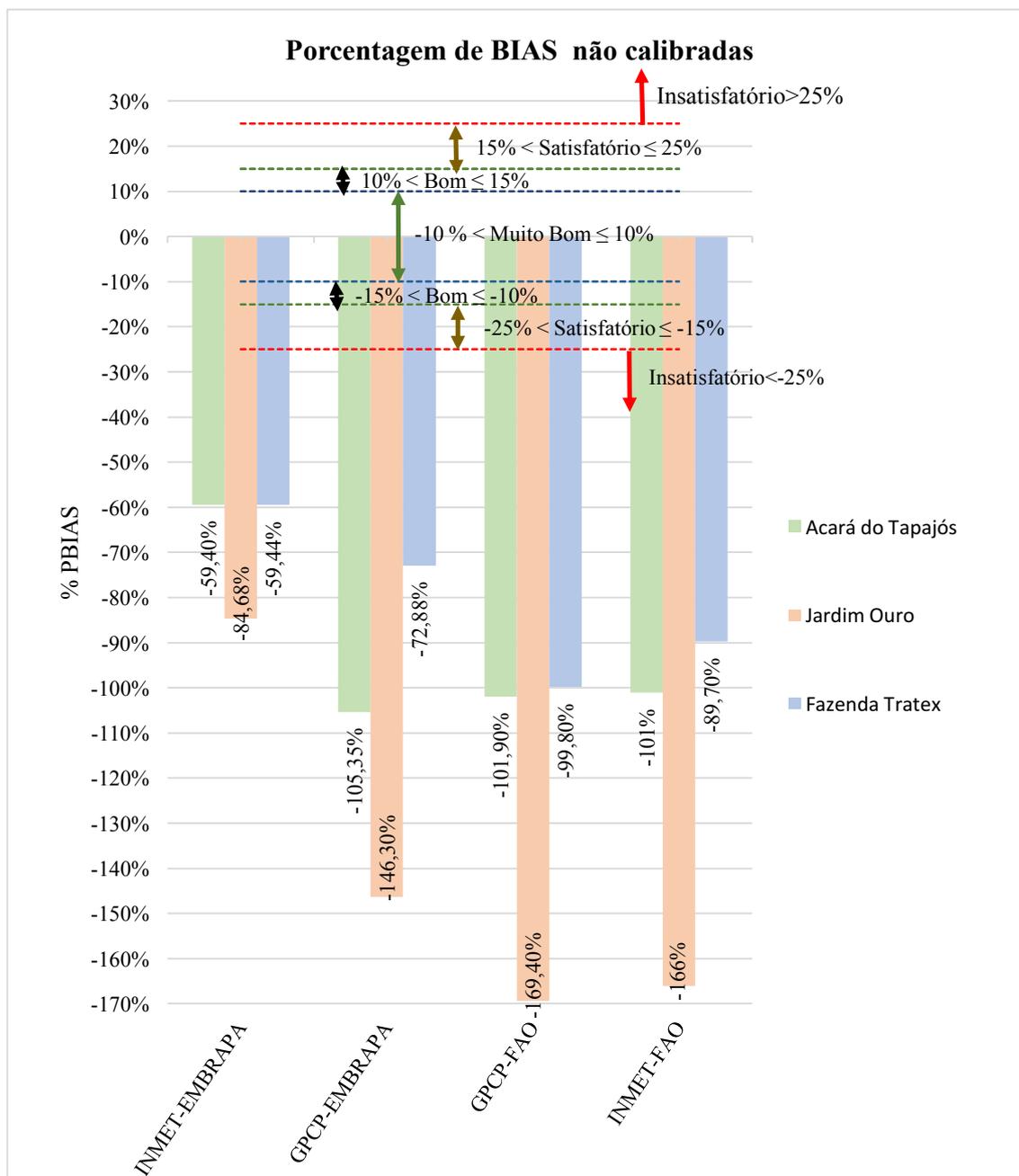


Figura 25: Porcentagem de BIAS para simulações não calibradas  
 Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As análises estatísticas destes resultados para as sub-bacias Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, demonstram que tanto os índices COE quanto PBIAS, evidenciam que as vazões simuladas são classificadas como insatisfatórias, tomando como base os valores de referência, ou seja, estas simulações não se ajustam de forma adequada as vazões observadas para todas as combinações dos dados de entrada. Entretanto, avaliando-se mais especificamente os resultados das combinações, tomando como base os índices de COE e PBIAS, a combinação INMET-EMBRAPA apresenta os melhores resultados, quando comparados com as demais combinações de dados de entrada.

Avaliando de forma mais detalhada os valores informados pelo SWAT, têm-se que a origem do problema é a superestimativa do escoamento superficial. Nestas simulações, o volume do escoamento representou valores superiores a 9,10% do total precipitado em todas as combinações das simulações, quando na verdade, esse valor não deveria ultrapassar os 3% (SILVA; OLIVEIRA, 1999; LIMA, 2010). O fator que mais contribui para a ocorrência desse fenômeno é o valor da Curva-Número (CN2), que difere muito dos solos americanos (para os quais o SWAT é inicialmente parametrizado) e dos brasileiros (CARVALHO, 2014). Os solos brasileiros são muito antigos e intemperizados, sendo, por isso, profundos e muito permeáveis. Nesse cenário, a fim de refletir a realidade local, o valor inicial do parâmetro CN2 deve ser ajustado, no processo de calibração (CARVALHO, 2014).

Nas figuras 26, 27 e 28 são apresentadas as vazões simuladas e vazões observadas no período de 1999 a 2002, para as sub-bacias Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, nestas é possível observar que a modelagem em SWAT seguiu a mesma tendência das vazões observadas em todas as três sub-bacias estudadas, entretanto, os picos das vazões foram superestimados, fato corroborado pelo valores negativos das PBIAS. Esse fenômeno já foi relatado em vários outros trabalhos com o SWAT, como Ferrigo et al. (2011), Salles (2012) e Castro (2013). Também deve ser acrescentado que os valores superestimados na modelagem aqui apresentados, possuem maior discrepância no período chuvoso. Tal fato pode ser atribuído ao baixo nível piezométrico em que os rios se encontram no início deste período. Desta forma, as chuvas intensas iniciais são armazenadas nos rios, a fim de que os mesmos encham. Só após atingir o equilíbrio que estes liberam vazões maiores, de acordo com a chuva.

A tabela 24 apresenta a média, valor máximo e mínimo da vazão para cada uma das sub-bacias, geradas pelas diferentes combinações das entradas (INMET-EMBRAPA, GPCP-EMBRAPA, GPCP-FAO e INMET-FAO). Percebe-se que os picos simulados são superiores aos observados, para as sub-bacias Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, em todas as entradas.

Quando analisamos a simulação das vazões mínimas, com as entradas (INMET-EMBRAPA, GPCP-EMBRAPA e INMET-FAO), o modelo apresentou uma tendência visível em subestimar tais vazões, cujos valores mínimos observados para as sub-bacias foram: Acará do Tapajós (2898 m<sup>3</sup>/s), Jardim Ouro (17.03 m<sup>3</sup>/s) e Fazenda Tratex (374 m<sup>3</sup>/s).

Em suma nas Figuras 26, 27 e 28 é possível observar visualmente que o modelo não conseguiu simular as vazões corretamente para a bacia Tapajós, os picos simulados foram muito maiores quando confrontados com as vazões observadas, resultados estes refletidos nos

índices de COE, PBIAS, na média das vazões, mínimos das vazões e máximo das vazões, desta forma torna-se recomendado a calibração do modelo de SWAT, para melhores resultados.

Tabela 24 - Média, limite máximo e mínimos das vazões, expressas em m<sup>3</sup>/s

Sub-bacia	Estatística	Vazões Observadas	Vazões sem Calibração INMET-EMBRAPA	Vazões sem Calibração GPCP-EMBRAPA	Vazões sem Calibração GPCP-FAO	Vazões sem Calibração INMET-FAO
Acará do Tapajós	Medias	7043.20	8515.00	15335.00	14800.00	5148.50
	Max	18557.20	84600.00	47730.00	90901.00	80499.00
	Mim	2898.00	27.99	31.30	6412.80	18.00
Jardim Ouro	Medias	477.05	983.20	1713.00	1924.60	1070.20
	MAX	3053.20	10400.00	7775.00	7961.00	10528.00
	Mim	17.03	31.44	20.87	226.87	121.44
Fazenda Tratex	Medias	630.96	656.30	1092.00	1254.33	766.05
	MAX	1948.77	11120.00	7492.00	7592.00	11183.00
	Mim	374.90	0.00	0.00	150.00	25.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

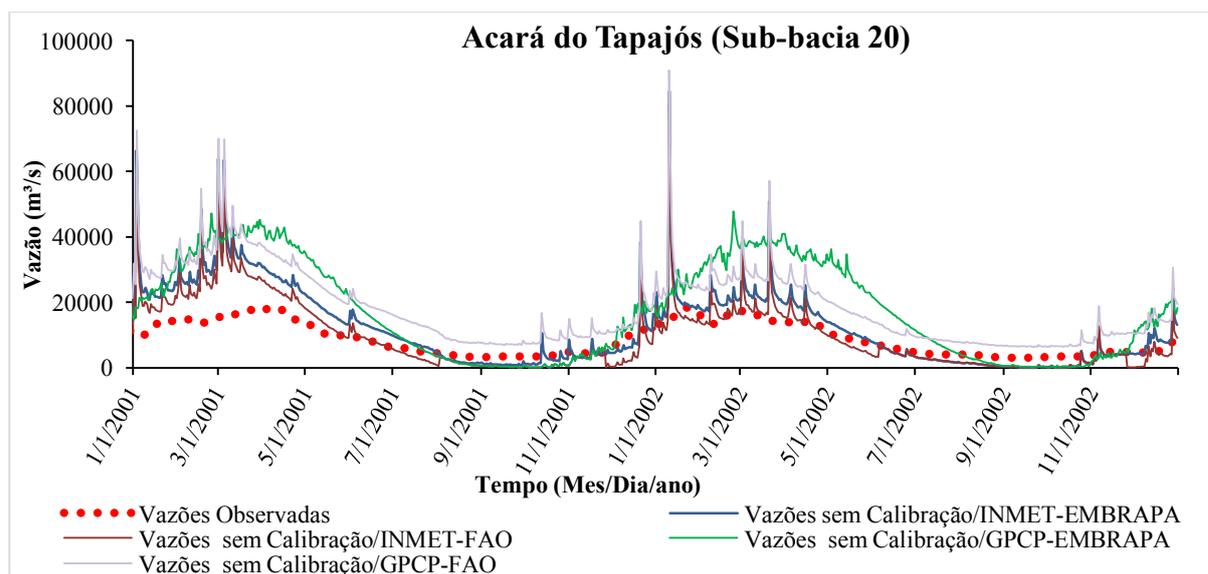


Figura 26 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para estação fluviométrica Acará do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores não calibrados

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

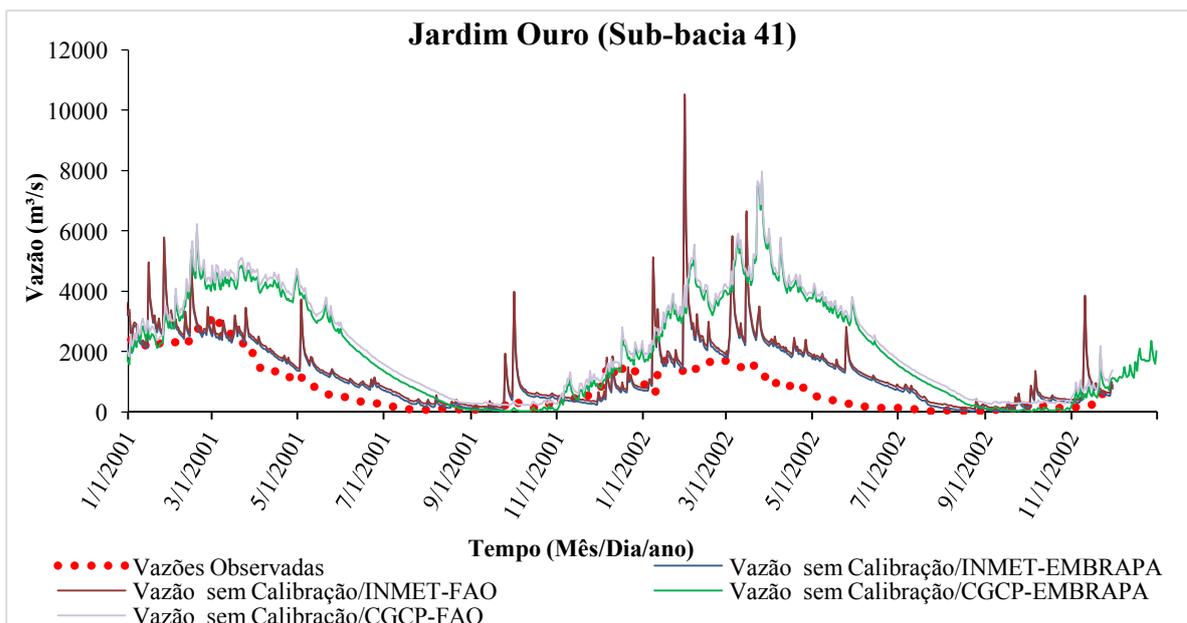


Figura 27 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para estação fluviométrica Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores não calibrados  
 Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

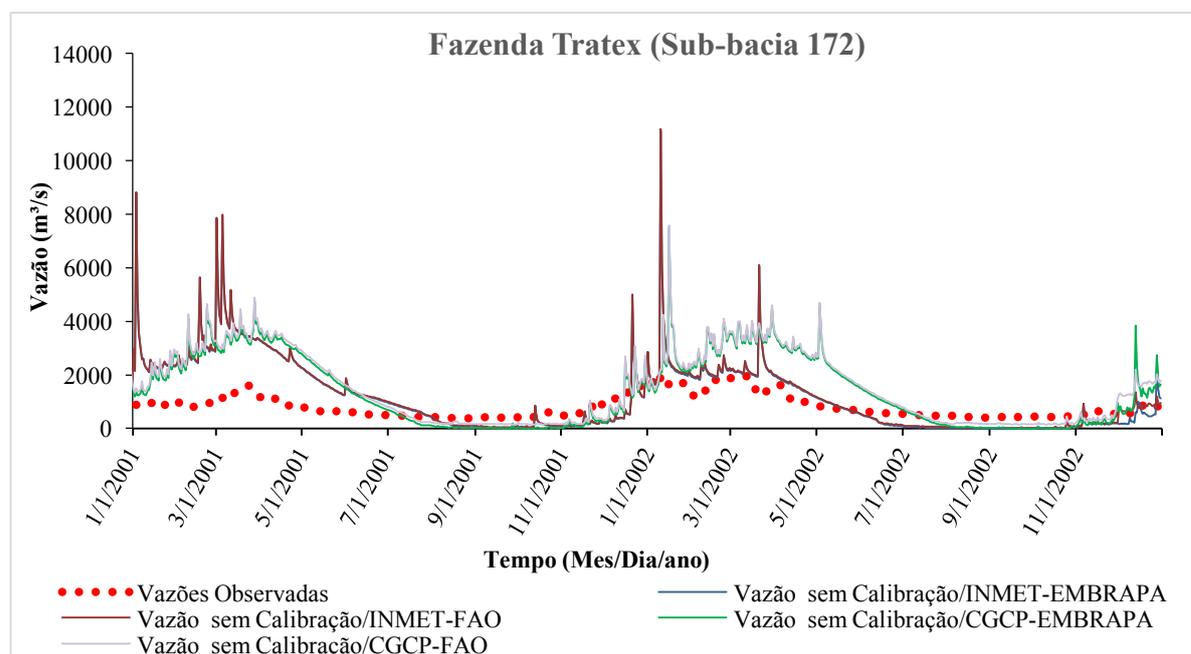


Figura 28 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada para a estação fluviométrica Fazenda Tratex (sub-bacia 172) com os valores não calibrados  
 Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

#### 5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

São apresentados os resultados da análise de sensibilidade com 1000 interações entre os parâmetros, realizada pelo SWAT CUP para cada uma das simulações, com as diferentes combinações das entradas INMET-FAO, GPCP-FAO, INMET-EMBRAPA e GPCP-EMBRAPA.

A escolha dos parâmetros mais sensíveis, foi realizada com auxílio da revisão bibliográfica, conforme descrito na metodologia, desta forma foram usados os parâmetros descritos na tabela 21. Dos 25 parâmetros analisados somente 15 apresentaram sensibilidade global relevante. Como existem simulações diferentes para cada combinação de dados de entrada, o ordenamento dos parâmetros fica diferente em cada caso. Com o intuito de facilitar a identificação de parâmetros que sejam frequentemente mais sensíveis que outros, foram obtidos a partir da análise de sensibilidade global e gerados pela análise de sensibilidade do algoritmo SUFI-2, os resultados avaliados em função dos valores de p-value e t-Stat, que estão expostos na figura 29.

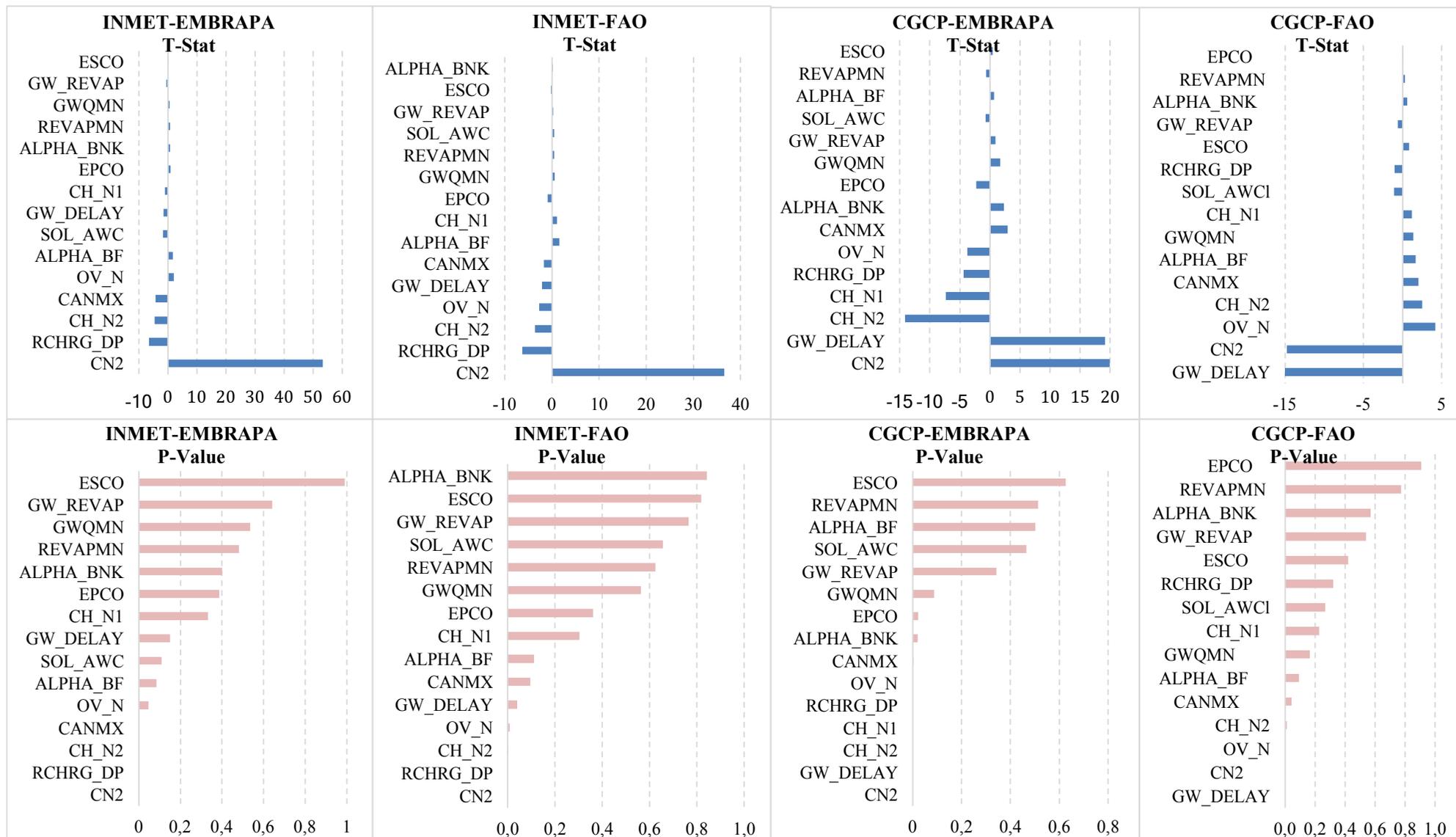


Figura 29 - Resultado da análise de sensibilidade global para bacia do rio Tapajós, ranqueando os parâmetros mais sensíveis em ordem crescente

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os menores valores de p-value e os maiores valores absolutos de t-Stat indicam maior sensibilidade do parâmetro hidrológico. O valor absoluto do t-Stat está relacionado ao grau de sensibilidade, já o p-value determina o grau de significância da sensibilidade dos parâmetros, quanto mais próximo de zero, maior a sua significância na modelagem (ABBASPOUR, 2015).

Avaliando tanto os valores de p-value quanto o t-stat, demonstram que o parâmetro CN2 (Valor inicial do SCS Curva-Número) foi o que apresentou maior influência entre as simulações, para a maioria das combinações (INMET-FAO, INMET-EMBRAPA e GPCP-EMBRAPA), exceto para a combinação GPCP-FAO, que foi o segundo parâmetro mais importante. Tal parâmetro (CN2) está relacionado à quantidade de escoamento com base no tipo de solo, uso do solo e condições antecedentes de umidade. É um dos parâmetros mais utilizados na calibração de modelos hidrológicos, em processos de modelagem de escoamento (ARNOLD et al, 2012). Este parâmetro também foi considerado como o mais sensível nos estudos de Fernandes (2015), Ghobadi et al. (2015), Rosa (2016) e Salles (2012).

Na simulação utilizando as entradas GPCP-FAO, o parâmetro com maior sensibilidade foi GW\_DELAY, que está relacionado ao tempo de retardo de água subterrânea, fato atribuído a entrada pedológica global da FAO, pois com os dados de entrada INMET-FAO, este parâmetro também teve sensibilidade significativa.

O parâmetro CH\_N2 (Coeficiente de Manning para os canais tributários), foi o terceiro mais sensível nas simulações com as combinações INMET-FAO, INMET-EMBRAPA e GPCP-EMBRAPA, quanto a simulação GPCP-FAO ficou em quarto. Um outro que merece destaque foi o parâmetro RCHRG\_DP (Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo), que foi avaliado como o segundo parâmetro mais sensível, tanto para o INMET-EMBRAPA quanto para o INMET-FAO.

Os resultados apresentados evidenciam que a sensibilidade dos parâmetros é influenciada, especialmente pela pedologia, topografia e por outros fatores físicos e climáticos, variáveis em cada sub-bacia (SCHMALZ; FOHRER, 2009), conforme o peso de cada um dos fatores. Desta forma, estes resultados corroboram aos apresentados por Van Greinsven et al. (2006), que alertam que resultados diferentes na sensibilidade dos parâmetros são comuns, devido, principalmente, as variações no clima e propriedades do solo, desta forma, cada nova simulação com estas entradas diferentes requer uma análise de sensibilidade para selecionar um conjunto de parâmetros a serem utilizados na calibração e/ou análise de incerteza do modelo. Entretanto, destacamos que dos 30 parâmetros avaliados, 15 se

mantiveram comuns, mesmo com as diferentes entradas propostas, alterando simplesmente o grau de sensibilidade entre eles.

Arnold et al. (2012), através da análise de diversas literaturas, relacionaram os parâmetros mais utilizados nos processos de calibração para vazão: CN2, SOL\_AWC, ESCO, EPCO, SURLAG, GW\_ALPHA, GW\_REVAP, GW\_DELAY, GW\_QMN, REVAPMIN e RCHARG\_DP. Desta forma, observa-se que os resultados gerados na análise de sensibilidade para as diferentes combinações de entradas estão em consonância com os encontrados na literatura.

## 5.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração automática dos 15 parâmetros levantados na análise de sensibilidade foi realizada com 1000 interações. Os valores dos parâmetros que apresentaram o melhor ajuste estão expostos na tabela 25, para cada um dos quinze(15) parâmetros realizou-se diversas variações do seu valor até que a vazão simulada se aproximasse o máximo possível da observada em campo.

Conforme pôde ser visto na Figura 16, ver item 4.3.5, foram selecionados três pontos de monitoramento diário nas estações fluviométricas. Assim, foi possível realizar a calibração com esses três pontos de valores diários de vazão disponíveis.

Tabela 25 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade e respectivos intervalos mínimo e máximo de variação

PARAMETRO	Min	Max	INMET- EMBRAPA	INMET- FAO	GPCP- EMBRAPA	GPCP-FAO
CN2	-4.25	4.25	2.37	3.00	0.23	-1.59
ALPHA_BF	0.00	1	0.76	0.18	0.75	0.05
GW_DELAY	0.00	500	385.74	246.51	466.50	18.50
GWQMN	0.00	5000	0.45	0.23	3515.00	4845.00
CANMX	0.00	100	3.30	0.35	53.30	71.70
ALPHA_BNK	0.00	1	0.71	0.23	0.78	0.56
CH_N2	0.00	0.50	0.20	0.24	0.12	0.24
CH_N1	0.00	1	0.23	0.15	0.24	0.47
EPCO	0.00	1	0.62	0.71	0.19	0.29
ESCO	0.00	1	0.61	0.67	0.17	0.69
GW_REVAP	0.00	0.20	0.18	0.15	0.14	0.04
OV_N	0.00	30	9.69	24.47	12.63	16.23
RCHRG_DP	0.00	1	0.61	0.56	0.36	0.54
REVAPMN	0.00	500	421.50	309.25	476.50	36.50
SOL_AWC	-0.25	0.25	-0.08	0.03	0.06	0.03

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O período de 1º de janeiro de 1979 a 01 de janeiro de 1999 foi utilizado como período de aquecimento do modelo, o período de 1º de janeiro de 2001 a dezembro de 2001 foi utilizado para a calibração do modelo e o período de 01/01/2002 a 31/12/2002, para validação.

Os valores do índice COE e porcentagem BIAS, são apresentados nas figura 30 e 31 respectivamente, para as estações fluviométricas de Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, onde foram usados os seguinte dados de entradas INMET-EMBRAPA, GPCP-EMBRAPA, GPCP-FAO e INMET-FAO, constata-se uma expressiva melhora na representação do modelo de SWAT na simulação da vazão, quando comparado aos valores obtidos sem calibração apresentados no item 5.3, Figura 24 e 25.

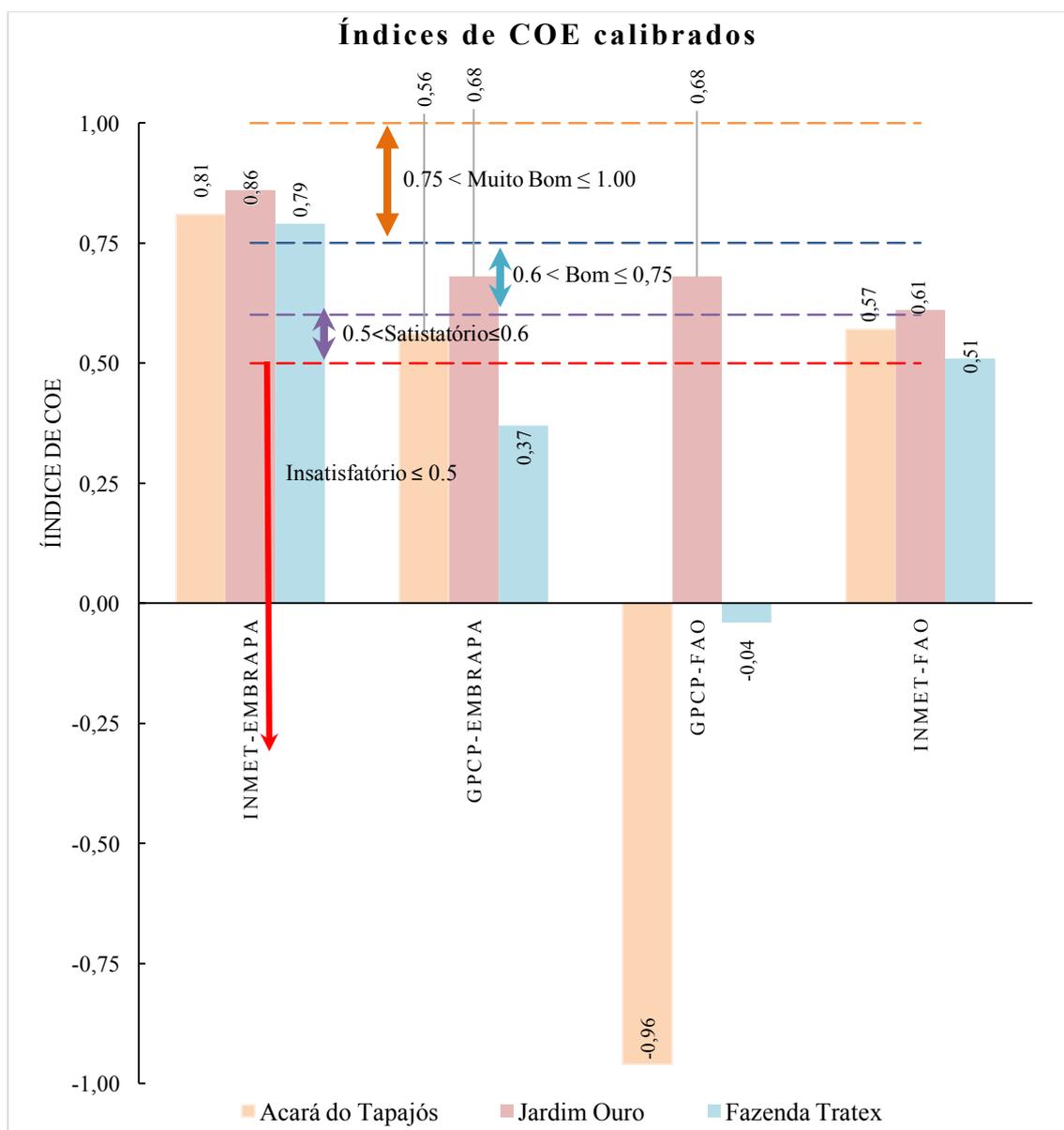


Figura 30 - Índices de COE para simulações calibradas  
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

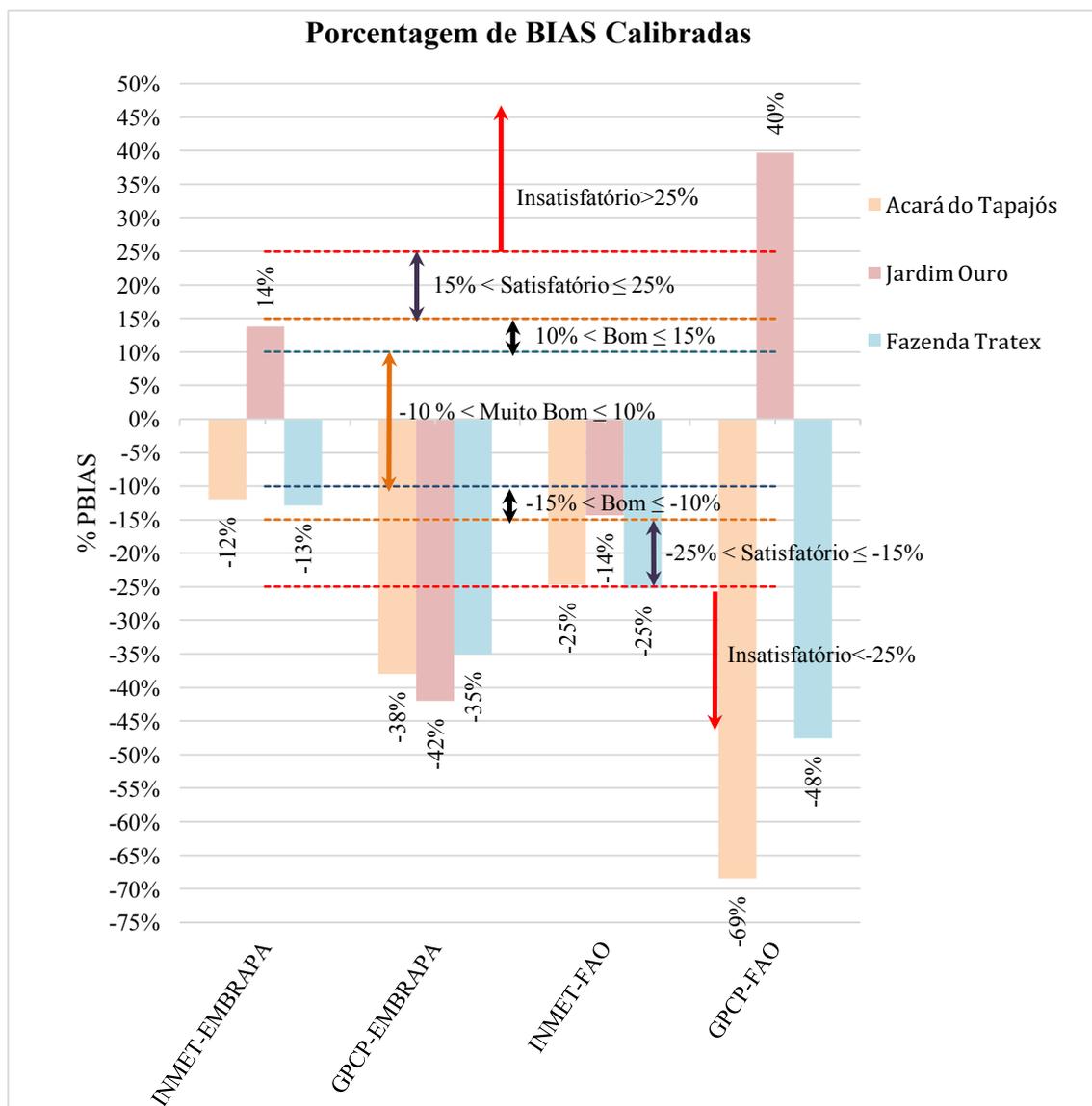


Figura 31 - Porcentagens de BIAS para simulações calibradas  
 Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A entrada INMET-EMBRAPA gerou melhores resultados, quando comparados com as simulações usando as outras entradas (GPCP-EMBRAPA, INMET-FAO e GPCP-FAO), originando maiores índices de COE para todas as sub-bacias, conforme se observa: Acará do Tapajós (0.81), Jardim Ouro (0.86) e Fazenda Tratex (0.79); foi observado que todos apresentaram resultados nas faixas do “muito bom”. Quanto a porcentagem de BIAS, as sub-bacias, Acará do Tapajós apresentou (-12%), Jardim Ouro (14%) e Fazenda Tratex (-13%), todos na faixa do BOM. Com isso a entrada INMET-EMBRAPA, mostrou correlação adequada quando confrontadas com os dados observados.

Na simulação utilizando dados de entrada GPCP-FAO, foram encontrados os menores índices de COE, para todas as sub-bacias, conforme segue: Acará do Tapajós (-0.96) e Fazenda Tratex (-0.04), enquadrando-se como insatisfatórios, já na sub-bacia Jardim Ouro

(0.68) enquadra-se como boa. No que se refere a porcentagem de BIAS para as sub-bacias de Acará do Tapajós (-68%), Jardim Ouro (40%) e Fazenda Tratex (-48%) se enquadraram como insatisfatórios, desta forma não houve ajuste adequado utilizando esta entrada, mesmo após a calibração.

Ao compararmos os índices de COE, para as simulações com as entradas INMET-FAO e GPCP-EMBRAPA, avalia-se que para a simulação usando INMET-FAO, todos os índices de COE apresentam-se na faixa do bom e as porcentagem BIAS são satisfatórias. Na simulação em que foram usados os dados de entrada GPCP-EMBRAPA, não obteve-se os índices de COE dentro dos limites satisfatórios (Fazenda Tratex COE 0.37), e todos as porcentagens BIAS ocorreram fora dos limites toleráveis.

Estes valores de COE encontrados nesta tese são semelhantes aos de Marchioro (2008) que aplicou o modelo SWAT em uma bacia hidrográfica no noroeste fluminense, estado do Rio de Janeiro, e encontrou valores do COE da ordem de 0.72 para vazões, enquanto Confessor; Whittaker (2007) calibraram o modelo SWAT para vazão diária e obtiveram um COE de 0.86 na bacia do rio Capoeira no Oregon. Machado (2002) aplicou o SWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão Marins, no período de 1999-2000 utilizando dados de vazão média diária e obteve um COE de 0.92.

Le Moine et al. (2007), comparando diferentes valores do coeficiente COE em SWAT, para diversos tamanhos de bacias hidrográficas, demonstraram que há menos falhas de modelagem na representação de bacias maiores do que de pequenas e médias, concluíram, desse modo, que quanto maiores as bacias hidrográficas melhores os desempenhos dos modelos.

Para a melhor compreensão do comportamento da bacia ao longo do período calibrado, nas Figuras 32, 33 e 34 são apresentadas as vazões simuladas juntamente com as observadas, para as sub-bacias do Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex, com as combinações INMET-EMBRAPA, INMET-FAO, GPCP-FAO e GPCP-EMBRAPA, já a tabela 26 traz a média, limite máximo e limite mínimo das vazões. Nestas se observam uma similaridade no comportamento destes processos e uma tendência leve de superestimação do modelo nos picos, mas que de forma geral revela claramente o esforço do modelo em adaptar-se as condições de calibração.

Tabela 26 - Média, limite máximo e mínimos das vazões

Sub-bacia	Estatística	Vazões Observadas	Vazões Calibradas INMET-EMBRAPA	Vazões Calibradas GPCP-EMBRAPA	Vazões Calibradas INMET-FAO	Vazões Calibrada GPCP-FAO
Acará do Tapajós	Media	7043.20	6687.14	8677.90	10020.35	12337.32
	Max	18557.20	23478.66	26411.30	21856.20	29716.89
	Mim	2898.00	2275.35	2395.96	5669.42	7597.35
Jardim Ouro	Media	477.05	498.33	897.20	661.05	653.33
	Max	3053.20	3131.20	3408.74	4623.20	3286.20
	Mim	17.03	21.17	24.04	233.03	176.17
Fazenda Tratex	Media	630.96	687.78	780.76	968.54	968.29
	Max	1948.77	3790.14	2834.62	2310.77	4045.14
	Mim	374.90	322.43	267.88	684.90	577.43

Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

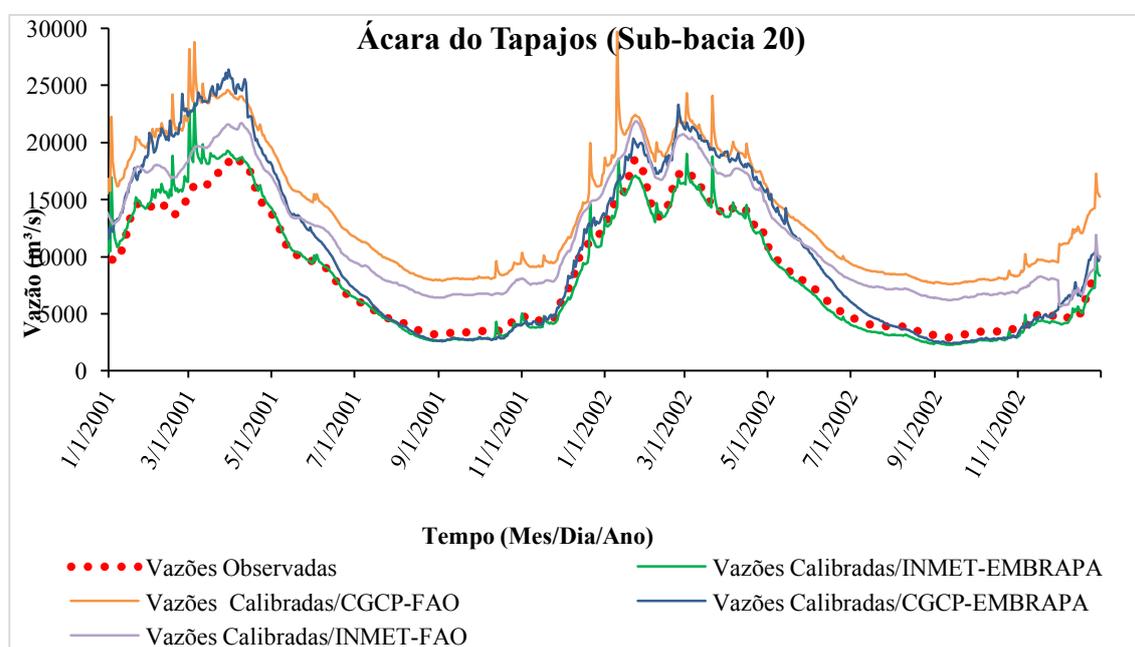


Figura 32 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Acara do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

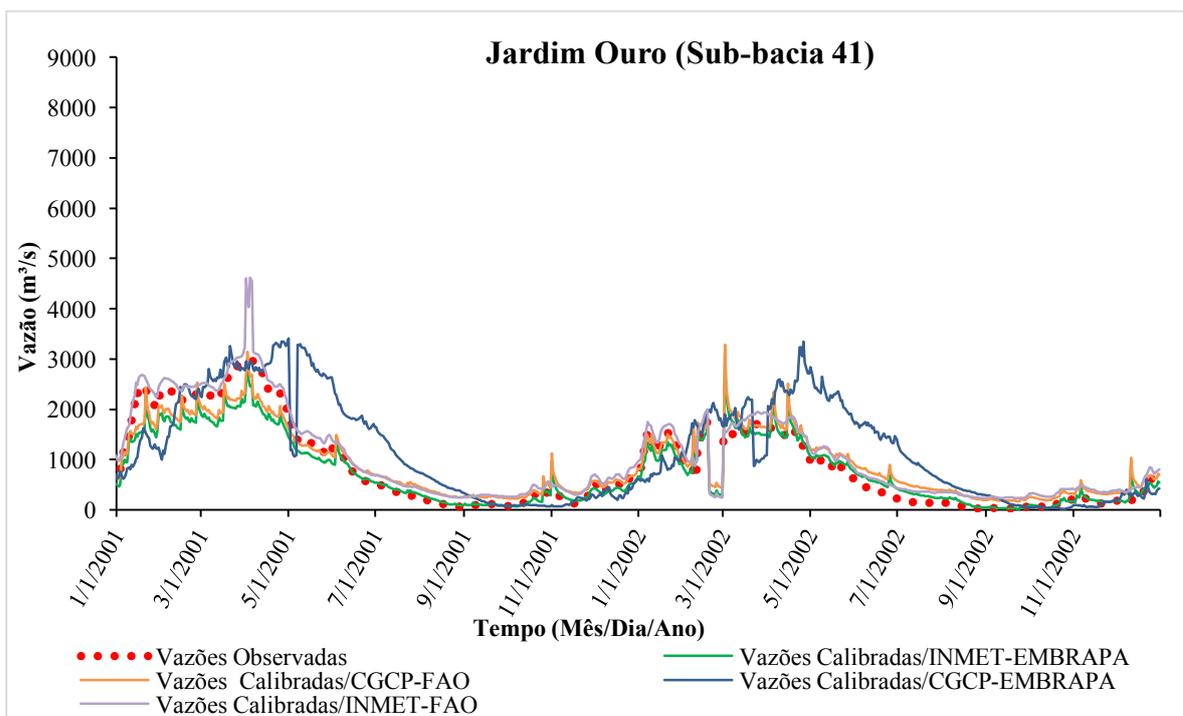


Figura 33 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

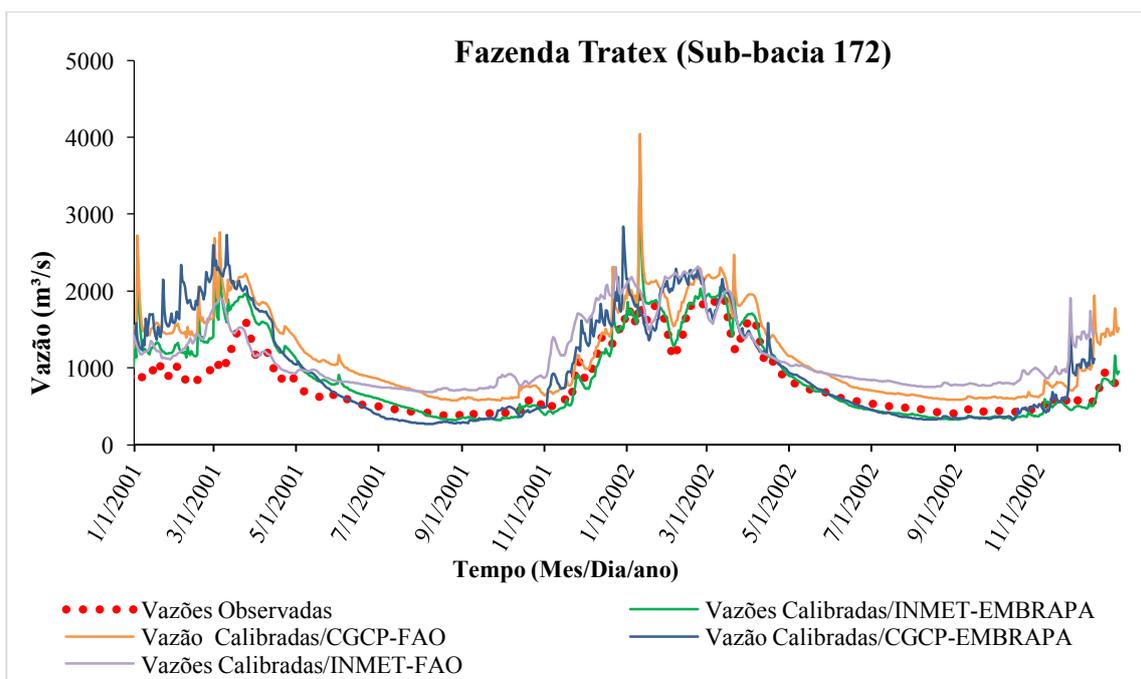


Figura 34 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Fazenda Tratex (sub-bacia 172), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 5.6 CENÁRIO DE USO DO SOLO EM 2007

Como exposto anteriormente, o objetivo desta simulação de cenário é confirmar a eficiência da modelagem de SWAT após os processos de parametrização e calibração para manter a correlação entre as vazões simuladas e observadas em campo, usando novamente como parâmetro de qualidade os índices de COE e Porcentagem BIAS, para as três sub-bacias: Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex.

Conforme exposto nos itens 5.3 e 5.5, a entrada de dados que gerou melhor consistência entre as vazões observadas e as simuladas pelo modelo de SWAT, na bacia do rio Tapajós, foi por meio da utilização da INMET-EMBRAPA, devido a isso, a utilizamos na parametrização (ver Tabela 31) desta simulação e a incorporamos na simulação quanto ao uso do solo 2007. Na tabela 27 apresentamos os índices de COE e as porcentagens BIAS para as sub-bacias Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex.

Os índices de COE para as sub-bacias do Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex estão na faixa muito boa, no que se refere às porcentagens BIAS permaneceram dentro das faixas aceitáveis, ou seja, mantiveram-se na mesma faixa onde se encontravam na simulação INMET-EMBRAPA, com uso do solo de 2001.

As figuras 35, 36 e 37 demonstram os hidrogramas das vazões simuladas nos exutórios de cada umas das estações fluviométricas Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex. Observa-se que o modelo tende a se ajustar aos dados observados em campo, mostrando boa correlação.

<b>Índice Estatísticos</b>	<b>Acará do Tapajós</b>	<b>Jardim Ouro</b>	<b>Fazenda Tratex</b>
COE	0.82	0.87	0.80
PBIAS	20.40%	-34.47%	-20.80%

Tabela 27 - Índice de COE e porcentagem em BIAS

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

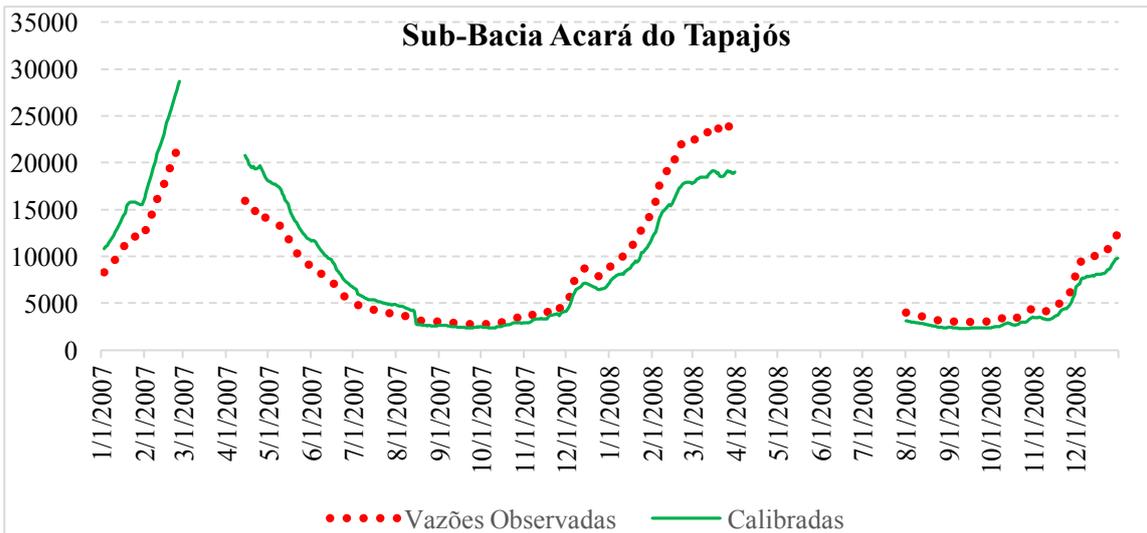


Figura 35 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Acará do Tapajós (sub-bacia 20), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

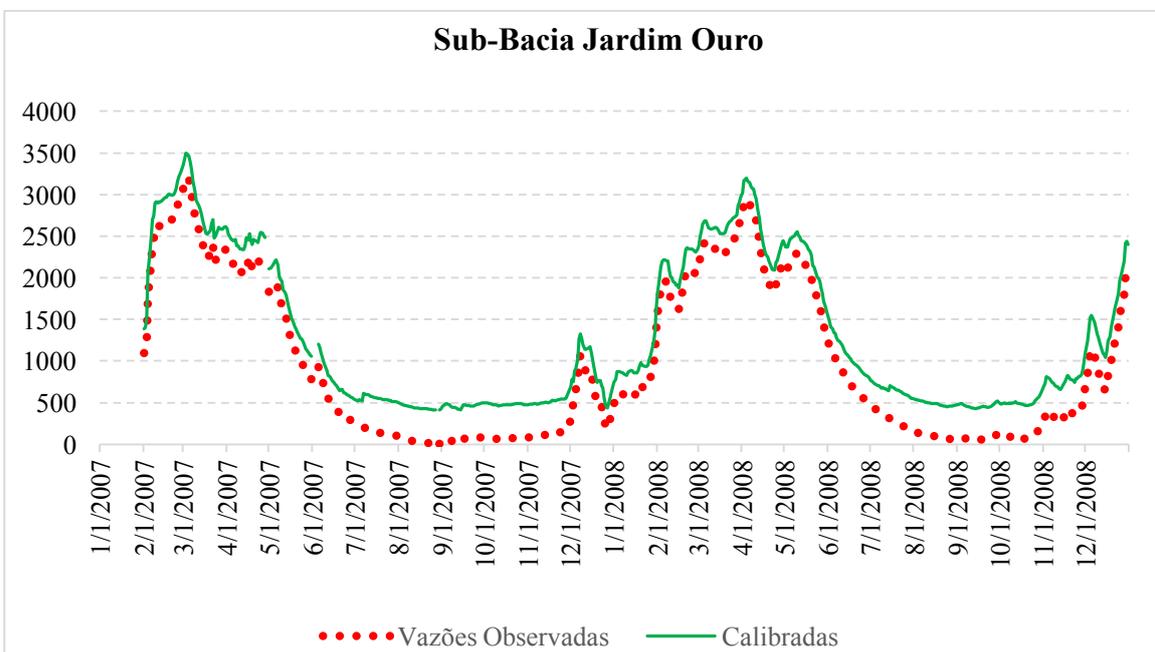


Figura 36 - Dados plotados de vazão observada e vazão simulada Jardim Ouro (sub-bacia 41), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

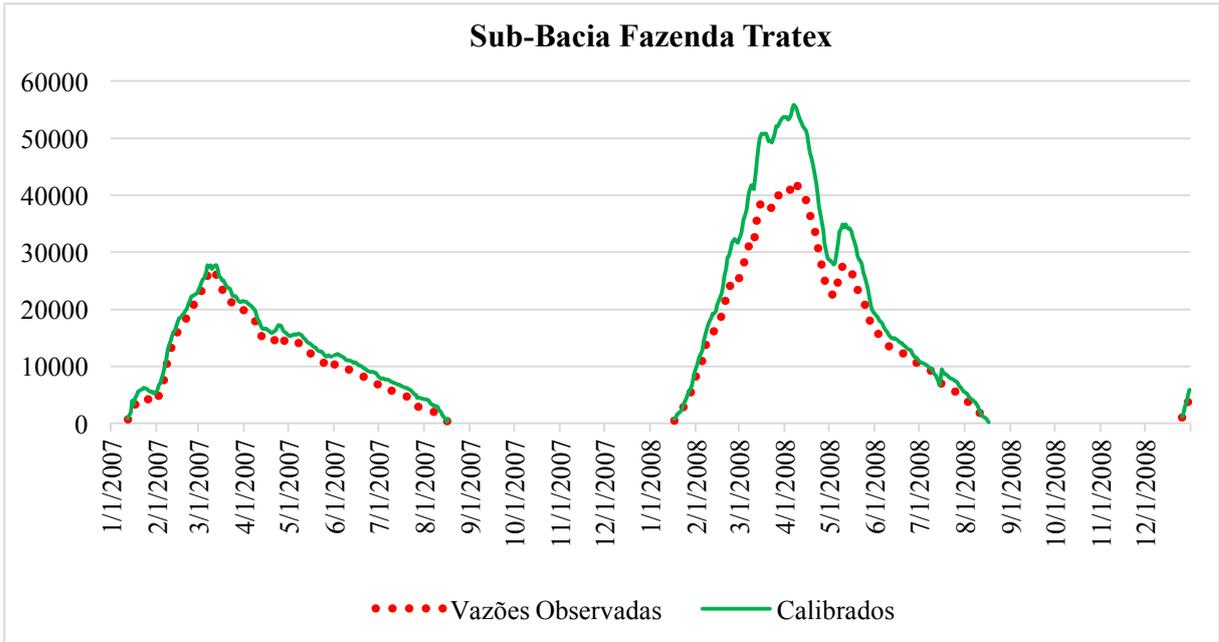


Figura 37 - Dados plotados da vazão observada e vazão simulada para Fazenda Tratex (sub-bacia 172), com os valores calibrados

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 6 CONCLUSÃO

Neste estudo, o modelo hidrológico SWAT foi utilizado na simulação de vazão para bacia do Rio Tapajós. O modelo foi calibrado usando três estações fluviométricas localizadas no exutório da bacia (Acará do Tapajós, Jardim Ouro e Fazenda Tratex). A calibração e a análise de sensibilidade foram realizadas com o algoritmo de otimização SUFI-2, através da interface SWAT-CUP.

- O SWAT é capaz de simular de forma satisfatória o escoamento superficial e a vazão na Bacia do Rio Tapajós, o desempenho do modelo na simulação da vazão foi estatisticamente eficiente, indicando que o mesmo conseguiu representar os processos hidrológicos referentes a estimativa da vazão da bacia em estudo, desta forma o mesmo pode ser utilizado na projeção de cenários alternativos. Assim, sua aplicação poderá contribuir na determinação de políticas de uso e ocupação do solo ao longo da bacia e no gerenciamento dos recursos hídricos da região, o que impactará diretamente na disponibilidade de água para usos consultivos e não-consultivos.

- Sem utilizar o recurso da calibração, o modelo apresenta clara tendência em superestimar as variáveis vazão, isso foi observado em todas as combinações de entrada (INMET-EMBRAPA, INMET-FAO, CGCP-EMBRAPA e CGCP-FAO).

- A determinação dos parâmetros hidrológicos mais sensíveis contribuiu para uma melhor compreensão do regime hidrológico na bacia, os parâmetros que tiveram maior influência na modelagem da bacia hidrográfica do rio Tapajós, segundo a análise de sensibilidade global, foram aqueles relacionados diretamente com os escoamentos superficial e subterrâneo, sendo eles: CN2, RCHRG\_DP, GW\_DELAY e CH\_N2. O parâmetro apresentando maior sensibilidade e importância para determinação do volume de escoamento superficial direto da vazão do rio Tapajós foi o CN2, ou seja, o número da curva inicial para a condição de umidade II para quase todas as combinações de dados de entrada, exceto para GPCP-FAO.

- Considerando os índices estatísticos, o modelo hidrológico SWAT apresentou melhores resultados nas simulações de vazões do rio Tapajós quando foi utilizado como entrada de dados do INMET-EMBRAPA, pois apresentou índices de COE e PBIAS dentro de valores

satisfatórios segundo Moriasi,2007, confirmando assim que os resultados medidos em campo e uma menor escala de dados pedológicos, geram melhores resultados de simulação.

- Na simulação utilizando uso e ocupação do solo para o ano de 2007, o modelo SWAT para a bacia do rio Tapajós, após parametrizado e calibrado foi capaz de manter boas correlações dos dados de vazão quando confrontadas com os dados das estações fluviométricas medidas em campo.

- Uma das limitações da aplicação da modelagem SWAT na bacia do rio Tapajós foi a disponibilidade de dados, principalmente das séries históricas de precipitação e vazão, esta limitação está relacionada ao número de estações de medição, sua distribuição ao longo da bacia e ao tamanho das séries temporais.

Desta forma são recomendados a futuros estudos:

- Aquisição de uma maior quantidade possível dos parâmetros de entrada necessários para a simulação do modelo SWAT, a fim de garantir a redução da incerteza dos processos de calibração;
- Criação e organização de uma base de dados brasileiro, contendo levantamentos pedológicos, climáticos e fluviométricos.
- Monitorar a bacia para assegurando a aquisição de uma longa série de dados, confiável e com pequeno número de falhas, permitindo a extensão das séries utilizadas para calibração e verificação dos processos sedimentológicos na bacia;
- Analisar o desempenho do modelo para a calibração e a verificação dos processos hidrossedimentológicos em períodos altos e baixos volumes pluviométricos, de forma isolada;
- Calibrar o modelo utilizando os dados de vazão e de produção de sedimentos monitorados em outras sub-bacias do Tapajós.
- Calibrar o modelo SWAT com saída (vazão e sedimentos) em diferentes escalas temporais e espaciais;
- Simular cenários de uso e ocupação do solo para avaliar as melhores práticas de manejo e os diferentes usos do solo, que podem ser utilizadas na bacia do Tapajós;
- Avaliar a importância das unidades de conservação, terras indígenas na manutenção da vazão e na produção de sedimento na bacia do rio Tapajós.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K.C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. *Calibration and Uncertainty Programs for SWAT*. <http://ebookbrowse.com/swat-cup-s17-abbaspour-pdf-d37453607>. Acesso em 16/04/2015.
- ABBASPOUR, K. C., M. SONNLEITNER, AND R. SCHULIN. 1999. *Uncertainty in Estimation of Soil Hydraulic Parameters by Inverse Modeling: Example Lysimeter Experiments*. Soil Sci. Soc. of Am. J., 63: 501-509.
- ABBASPOUR, K.C., YANG J., MAXIMOV I., SIBER R., BOGNER K, MIELEITNER J., ZOBRIST J., AND SRINIVASAN R. (2007). *Spatially-distributed modelling of hydrology and water quality in the pre- alpine/alpine Thur watershed using SWAT*. Journal of Hydrology, 333: 413-430.
- ALBAGLI, S. *Amazônia: fronteira geopolítica da biodiversidade*. Brasília, DF: IBAMA, 1998. p.199-221.
- ALENCAR, A., et al. *Desmatamento na Amazônia: indo além de uma emergência crônica*. Belém, IPAM, 2004.
- ARAÚJO R. C., XIMENES P. M., *Agronegócios na Amazônia: ameaças e oportunidades para o desenvolvimento sustentável da região*, Revista de Ciências Agroambientais, Alta Floresta, MT, UNEMAT – ISSN 1677-6062.
- ARIMA, E.; BARRETO, P.; BRITO, M.; *Pecuária na Amazônia: tendências e implicações para a conservação ambiental*. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2005.
- ARNOLD, J. G; *Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development*. Journal of the American Water Resources Association. Illinois, v. 34, n. 3, p. 73-89, Feb. 1998.
- ARNOLD, J. G. et al. *Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 227, n. 1/4, p. 21-40, Mar. 2000.
- 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*. Transactions of the ASABE, v.54, p.1491-1508, 2012.
- ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S. L.G; *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation*, v.2009. Texas Water Resources Institute Technical Report n.365. Texas A&M University System. College Station, Texas. Setembro, 2011.
- ASSAD, E.D.; MASUTOMO, R.; ASSAD, M.L.L. *Estimativa das precipitações máximas prováveis com duração de 24 horas e de 30 minutos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 24 (5):677-686, maio/1992.
- ATLAS, D. *Radar in meteorology: Battan memorial and 40th anniversary*. Boston, 1987. Radar Met. Conf. Boston, AMS, 1990.
- AZEVEDO S. C.; *Detecção e restauração de áreas sombreadas em imagens digitais de alta resolução espacial*. UNESP, SP - 2014.
- BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica swat (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT*, 2005.
- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. *Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios*

- Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Vol. 34, 2010.
- BARSANTI, P.; DISPERATI, L.; MARRI, P.; MIONE, A. *Soil erosion evaluation and multi-temporal analysis in two brazilian basins*. 2003. 2<sup>nd</sup> International SWAT Conference. TWRI Technical Report 266. Baria/Italy.
- BEVEN, K. *Changing ideas in hydrology - the case of physically based models*. *Journal of Hydrology*, 105:157-172. 1989.
- BEVEN, K.; BINLEY A. *The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction*. *Hydrological Processes*. 6(3), 279-298. 1992.
- BEVEN, K.; FREER, J. *Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology*. *Journal of Hydrology*, 249 (1–4), 11–29. 2001.
- BICKEL, U. *Brasil: expansão da soja, conflitos sócio-ecológicos e segurança alimentar*. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical,) – Faculdade de Agronomia, Universidade de Bonn, Alemanha, 2004.
- BRASIL, *Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia Legal*. Brasília, DF, 2004. Disponível em: [www.planalto.gov.br/casacivil/desmat.pdf](http://www.planalto.gov.br/casacivil/desmat.pdf). Acesso em: 14/05/2016
- BRASIL. Lei Nº 9.433, DE 08 DE JANEIRO DE 1997. *Política Nacional de recursos hídricos*, Brasília,DF, janeiro 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 12 out. 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. Vol. 8, No. 3, 2015.
- BRUIJNZEEL, L. A. *Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of knowledge review*. Paris: UNESCO, 1990. 226 p.
- CALHEIROS, R.V. ZAWADZKI, I. *Statistically derived Z-R relationship for hydrology*. 20th RadarMet.Conf. Boston, AMS, 1981.
- CAMPBELL, G.S. *A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data*. *Soil Sci.*, 117:311-314, 1974.
- CARVALHO NETO, J. G. *Simulação hidrossedimentológica da bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT*. 2011. Dissertação (Mestrado) - PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande, 2011.
- CARVALHO, F. H. *Uso do modelo swat na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do cerrado brasileiro*, Brasília, 2014.
- CARVALHO, N. de O. *Hidrossedimentologia prática*. Interciência. 2a Edição. Rio de Janeiro, 2008.
- CARVALHO, R. *A Amazônia Rumo ao “Ciclo da Soja”*. In: *Amazônia*. Informação e Diálogo na Sociedade Amazônica: Amigos da Terra, 1999.
- CASTRO, K.B. *Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada*. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências – Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2013.
- CHOW, VEN TE. *Handbook of applied hidrology*. Ed. McGraw-Hill, Inc. EUA. 1964.
- CINQUINI, J.A. *Identificação de imagens Landsat no período de cheia e de seca para interpretação de savanas estépica (Chaco) e seus contatos florísticos no Pantanal*. Anais do

- simpósio brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011.
- CLAPP, R.B.; HORNBERGER, G.M. *Empirical equations for some soil hydraulic properties*. Water Resour. Res., 14:601-604, 1978.
- COE, M.T., COSTA, M.H., SOARES FILHO, B.S. *The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks*. Journal of Hydrology, v. 369, p.165–174, maio, 2009.
- COLLISCHONN, W., 2001. *Simulação hidrológica de grandes bacias. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul/RS*.
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. *Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos correlacionados*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29, n. 5, p.777-788, 2005.
- CONFESOR JUNIOR, R. B.; WHITTAKER, G. *Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters*. Saint Joseph: ASAE, 2007. 40 p.
- COSTA, M. H., et al. *Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion*. Geophysical Research Letters, v.34, n.7, p 1-4, 2007.
- COSTA, M.H., BOTTA, A., CARDILLE, J.A. *Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia*. Journal of Hydrology, v. 283, p. 206-217, 2003.
- COSTA, M.H., FOLEY, J.A., 2000. *Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the climate of Amazonia*. Journal of Climate 13, 18-34. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)0132.0.CO2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)0132.0.CO2)
- CRÓSTA, A.P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas, IG/UNICAMP, 1992.
- CRUZ, S. I. V. L. *Monitoramento e modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Siriri Vivo – SE*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2012.
- DAWES, W.; *Program structure and numerical solutions*. In: Zhang, L.; Dawes, W., ed. WAVES: an integrated energy and water balance model. Canberra, CSIRO, 1998.
- DAWES, W.R.; SHORT, D.; *The significance of topology for modeling the surface hydrology of fluvial landscapes*. Water Resour. Res., 14:601-604, 1978.
- DAWES, W.R.; SHORT, D.L.; *Topog series topographic analysis and catchment drainage modeling package: user manual*. Canberra, CSIRO. 1988.
- DE BIASI, M. 1970, 'Cartas de Declividade: Confecção e Utilização', *Geomorfologia*, no. 21. pp. 8 – 12. São Paulo.
- DENT, D.; YONG, A. *Soil survey and land evaluation*. London, G. Allen e Unwin, 1981. 278p.
- DURÃES, M. F. *Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.
- EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. S. *Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas*. Journal of Hydrology, 2008. Disponível em:

- <<http://www.hydrology.bee.cornell.edu/Papers/EastonJHYDROL08.pdf>>. Acesso em: 15 julho. 2016.
- EMBRAPA; *Manual de Metodos de Analise de Solos da Embrapa*; Distrito Federal, 1997
- FEARNSIDE, P. M.; *Carga Pesada: O custo ambiental de asfaltar um corredor de soja na Amazônia*, In: TORRES, M (ed.) *Amazônia Revelada: os Descaminhos ao Longo da BR-163*, Brasília, DF, 2005a.
- FEARNSIDE, P. M.; *A floresta amazônica nas mudanças globais*; Manaus: INPA, vol 1, 134 p., 2003.
- FEARNSIDE, P. M.; *Combate ao desmatamento na Amazônia brasileira*. Cadernos da Biodiversidade, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 35-39, 1999.
- FEARNSIDE, P. M.; *Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências; Megadiversidade*, vol. 1, n. 1, p. 114-123, jul, 2005.
- FEARNSIDE, P. M.; *Environmental services as an strategy for sustainable development in rural Amazonia*. *Ecological Economics*, v. 20, p. 53-70, 1997.
- FEARNSIDE, P. *Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil*. *Environmental Conservation*, 28 (1), pp:23-38, 2001
- FERNANDES, J.G. *Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT*. 2015, 185f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados*, n. 19, 2005.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.T.; ROIG, H.; KOIDE, S. *Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural*. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Foz do Iguaçu, 2012.
- FERRIGO, S.; MINOTTI, R.; KOIDE S. *Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos decorrentes de diferentes cenários de uso do solo na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal*. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, 2011.
- FERRIGO, S.; MINOTTI, R.; ROIG, H.L; KOIDE S. *Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automatizada do modelo SWAT* In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.
- FGV. *Amazônia Legal: Propostas para uma exploração agrícola sustentável*, FGV, EESP, Centro de Estudos do Agronegócio, 2016.
- FILHO, M. O., NETO, V. H., *Processamento Digital de Imagens*, Rio de Janeiro: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.
- FRANCO A. M., TEIXEIRA A. H. C.; *Uso do satélite Landsat 8 na determinação da produtividade da água em bacia hidrográfica com predomínio do uso agrícola da cana-de-açúcar*(Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE).
- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, Guillermo Acosta. *Hidrologia*. 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 1999.
- GASH, J.H.C. *An analytical model of rainfall interception by forests*. Q.J.R. Met. Soc., 105:43-55, 1979.
- GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F.; *Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation*. *BioScience*, v. 52, 2002.

- GEIST, H.; LAMBIN, E. *What drives tropical deforestation? A meta analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. LUCC International Project Office, Louvain-la-neuve - Belgium, 2001.
- GHOBADI, Y.; PRADHAN, B.; SAYYAD, G. A.; KABIR, K.; FALAMARZI, Y. *Simulation of hydrological processes and effects of engineering projects on the Karkheh River Basin and its wetland using SWAT2009*. Quaternary International, v. 374, p. 144-153, 2015.
- GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. *Macro-scale hydrological modeling: a Scandinavian experience*. In: international symposium on: can science and society save the water crisis in the century: reports from the world, 1., 2000, Tokyo. Proceedings... Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, p. 38-45. 2000.
- GREEN, C.H.; VAN GRIENSVEN, A., 2008. *Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds*. Environmental Modelling & Software. 23, Issue 4, 422- 434.
- GRIENSVEN, A. van et al. *A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 324, n. 1/4, Apr. 2006.
- GRIENSVEN, A. Van. *Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT*. 2005. Disponível em: <<http://groups.google.com/group/swatuser/files>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
- GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S. AND YAPO, P.O. 1999. *Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with m multilevel expert calibration*. J. Hydrologic Eng. 4(2): 135-143.
- HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; A. H. C. TEIXEIRA; *Uso do satélite Landsat 8 na determinação da produtividade da água em bacia hidrográfica com predomínio do uso agrícola da cana-de-açúcar*; Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- HEWLETT, J.D. *Principles of forest hydrology*. Athens, University of Georgia, 1982.
- HOMMA, A.K.O. & CARVALHO, R.A.C., *A expansão do monocultivo da soja na amazônia: início de um novo ciclo e as conseqüências ambientais*. in: II Encontro da sociedade brasileira de economia ecológica, São Paulo, 1997.
- <http://desktop.ArcGIS®.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/basin.htm>, Acesso em 23.03.2017.
- <http://homepage.ufp.pt/biblioteca/WebThesaurus/Pages/PageC1.html>, acessado em 15 de janeiro de 2017
- [http://www.abiove.org.br/site/\\_FILES/Portugues/25072013-105434-37.\\_sober.pdf](http://www.abiove.org.br/site/_FILES/Portugues/25072013-105434-37._sober.pdf)
- HUTCHINSON, M. F., 1989, *A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data With Automatic Removal of Spurious Pits*, Journal of Hydrology, v. 106, pp. 211-232.
- HUTCHINSON, M. F., 1996, "A Locally Adaptive Approach to the Interpolation of Digital Elevation Models", In: Proceedings of 3rd International Conference / Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, January 21-26, Disponível em: <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf>. Acessado: em: maio de 2015.
- JARVIS, P.G.; MCNAUGHTON, K.G. *Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region*. Adv. Ecol. Res., 15:1-49, 1986.
- JHA, M., GASSMAN, P. W., SECCHI, S., GU, R., ARNOLD, J. (2004). *Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, And Nutrients Predictions*. Journal of the American Water Resources Association.

- JUNIOR, J. L. B. *Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiá por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.
- KAIMOWITZ, D., MERTENS, B., Wunder, S., PACHECO, P. *A Conexão hambúrguer alimenta a destruição da Amazônia: desmatamento e pecuária na Amazônia*. Disponível em: [http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf\\_files/media/ Amazon-Portugese](http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/media/Amazon-Portugese). Acesso em: 12 fev. 2016.
- KAIMOWITZ, D.; ANGELSEN, A. *Economic models of tropical deforestation: a review*. CIFOR - Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia, 1998.
- LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. *Applications of physiological ecology to forest management*. New York, Academic Press, 1997.
- LE MOINE, N.; ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C. “Outlier” catchments: what can we learn from them in terms of prediction uncertainty in rainfall-runoff modelling? *Iahs publication*, v. 313, p. 195-203, jul. 2007.
- LIBOS, M.I.P.C. *Modelagem da poluição não pontual na Bacia do Rio Cuiabá baseada em geoprocessamento*. Rio de Janeiro, 2002, 296 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro/RJ.
- Liersch, S. The Program pcpSTAT: user’s manual. Berlin. 2003.
- Liersch, S. The Programs dew.exe and dew02.exe: user’s manual. Berlin. 2003.
- LIMA, J.E.F.W ; LOPES, W.T.A. ; OLIVEIRA-FILHO, E. C. ; MUNIZ, D.H.F; REATTO, A; MARTINS, E.S; SILVA, E.M. *Comparação entre métodos de amostragem de sedimentos em suspensão em pequenos cursos d’água da bacia experimental do alto Rio Jardim, DF*. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Brasília. 2010.
- LIMA, J.E.F.W. *Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado*, 2013.
- 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*. 2010. 312 f. Tese de Doutorado, Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2010.
- MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.
- MACHADO, W.C. P. *Indicadores de qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do rio Pato Branco - Sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006. Disponível em: Acesso em: 3 abr. 2016.
- MACHADO. R. E.; VETTORAZZI, C. A. *Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP)*. Rev. Bras. Ciênc. Solo. vol.27, n.4. Viçosa. Julho/Agosto. 2003.
- MAIDMENT, D.R. *GIS and hydrologic modeling*. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993.
- MALUTTA, S. *Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.
- MARCHIORO, E. *Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria:*

subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste Fluminense. 2008. 196 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARGULIS, S. *Causas do desmatamento na Amazônia brasileira*. The Word Bank, Brasília, 2003. Disponível em: [www.finefrint.com](http://www.finefrint.com). Acesso em: 16 de maio de 2016.

MARQUES FILHO, Ogê; VIEIRA NETO, Hugo. *Processamento Digital de Imagens*, Rio de Janeiro: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.

MCGRATH, D., *Biosfera ou biodiversidade: uma avaliação crítica do paradigma da biodiversidade*. In: XIMENES, TEREZA (Org.) *Perspectivas do desenvolvimento sustentável: uma contribuição para a Amazônia*. Belém: NAEA, 1997.

MCGRATH, D., *Biosfera ou biodiversidade: uma avaliação crítica do paradigma da biodiversidade*. In: Ximenes, Tereza (Org.) *Perspectivas do desenvolvimento sustentável: uma contribuição para a Amazônia*. Belém: NAEA, 1997.p. 33-69.

MCGRATH, D.; VERA-DIAZ, M. d. C.. *Soja na Amazônia: impactos ambientais e estratégias de mitigação*. *Ciência & Ambiente*, 2006.

MENEZES, M. D. *Levantamento de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga de aquíferos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

MERCURI E. G. F., LOHMANN M., DEPPE F., SIMÕES K. *Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras*; Instituto Tecnológico SIMEPAR; 2011.

MERCURI, E. G. F.; DEPPE, F. A. C.; LOHMANN, M.; SIMOES, K. *Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras*. In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto, 14., 2009, Natal, RN. Anais... Natal: INPE, p. 4773-4780. 2009.

MMA. *Levantamento da ictiofauna, caracterização genética e da fauna parasitária da bacia hidrográfica do rio tapajós – 2011*, Disponível em: [http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/o-que-fazemos/proj\\_apoiados/resumo\\_projeto\\_313.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/o-que-fazemos/proj_apoiados/resumo_projeto_313.pdf), Acesso em: 13 de setembro de 2016.

MOORE, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K.; Band, L.E. *GIS and landsurface-subsurface process modeling*. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.;ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993.Cap. 19, p. 196-230.

MOREIRA, M. L. C.; VASCONCELOS, T. N. N. *Mato Grosso: solos e paisagens*. Cuiabá/MT: Entrelinhas, 2007.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. 2007. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. 1970. *River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles*. *Journal of Hydrological*, v. 10(3), p. 282-290.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY J.R.; WILLIAMS, J.R. *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2005*. *Agricultural Research Service and Texas AgriLife Research*. Texas, 2005.

NEPSTAD, D. C. *Globalization of the Amazon Soy and Beef Industries: Opportunities for Conservation*. *Conservation Biology*, v. 20, n. 6, p. 1595-1603, 2006.

NEPSTAD, D., MCGRATH, D., STICKLER, C., ALENCAR, A., AZEVEDO, A., SWETTE,

- B., BEZERRA, T., DIGIANO, M., SHIMADA, J., MOTTA, R., ARMIJO, E., CASTELLO, L., BRANDO, P., HANSEN, M., MCGRATH-HORN, M., CARVALHO, O., HESS, L., *Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains*. Science 344 (6188): 1118-1123, 2014.
- NOBRE, C.A., SELLERS, P.J., SHUKLA, J., 1991. *Amazonian deforestation and regional climate change*. *Journal of Climate* 4, 957-988. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)0042.0.CO2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1991)0042.0.CO2)
- OLIVEIRA, M.Q.C. *Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes e sua repercussão na zona costeira*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia/Ba. 1999.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia Vegetal*. Ed. Agronômica Ceres. São Paulo/SP. 1981.
- PEROBELLI, F. S., ALMEIDA, E. S., SOUZA, M. C., SOUZA, R. M.; *Produção de soja na região sul do Brasil (1991-2003): uma análise espacial*. Texto para discussão NUPE n° 23. UFJF, 2005.
- PFAFSTETTER, O. *Chuvas intensas no Brasil*. Brasília: Departamento Nacional de Obras e Saneamento, 1957. 246 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, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.
- PONTES, S.H.N.; FERNANDES, I.V. *Atualização do método das isozonas para a região amazônica*. Anais do VIII Encontro de Iniciação Científica e Pós-graduação do ITA. São Paulo/SP. 2002.
- RAPIDEYE, *Satellite Imagery Product Specifications*. ANO.2016 Disponível em: < [www.rapideye.com](http://www.rapideye.com) >. Acesso em 01 de nov. 2016.
- REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S.; PILOTTO, J.E. *Daily rainfall variability at local scale (1,000 ha)*. In: Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. *Sci. Agric.*, 52(1):43-49, 1995.
- RIVERO, S.; ALMEIDA O.; ÁVILA S.; OLIVEIRA W. *Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia*. Nova econ. vol.19 no.1 Belo Horizonte Jan./Apr. 2009.
- ROSA, D. R. Q. *Modelagem Hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT*. 2016. 127f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- RUDOLPH F. A. P. TEIXEIRA. *Amazônia Legal e o estado de mato grosso: dois ensaios sobre o processo de convergência espacial para o desmatamento*. UNESP, SP, 2010.
- RUHOFF, A. L. *Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas*. UFSM, Santa Maria, 2004.
- RUNNING, S.W.; COUGHLAN, J.C. *A general model of forest ecosystem processes for regional applications: I – hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes*. *Ecol. Modelling*, 42:125-154, 1988.
- SALLES, L. A. *Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pípiripau*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.
- SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. 1967, *The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV. A method of estimating the available water capacities of profiles*

*in the field*, J. Soil Sc. 18: pp174-181.

SAMMONS, N.; NEITSCH, S. L. *Until interface for SWAT2000: user guide*. Washington: GUAR, 2000.

SAMPAIO, G. *Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion*. Geophysical Research Letters, n.34, 2007.

SANTHI, C., ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., DUGAS, W.A., SRINIVASAN, R., HAUCK, L.M. 2001. *Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources*. J. Am. Water Resour. Assoc. 37(5): 1169–1188.

SCHMALZ, B. & FOHRER, N. *Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model*. Adv. Geosci., 21:91-98, 2009.

SCHNEIDER, R; ARIMA, E; VERÍSSIMO, A; BARRETO, P; SOUZA JÚNIOR, C. *Amazônia sustentável: limitantes e oportunidades para o desenvolvimento rural*. Séries parcerias Banco Mundial – Brasil e IMAZON, 2000.

SECEX – SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR. Disponível em: [www.desenvolvimento.gov.br/sitio/secex/secex/competência.php](http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/secex/secex/competência.php). Acesso em: 17 de fevereiro de 2017.

SERGIPE. Superintendência de Recursos Hídricos. *Atlas Digital sobre os Recursos Hídricos de Sergipe*, Aracaju: SEPLANTEC-SRH, 2004.

SILVA, C.L; OLIVEIRA, C.A.S. *Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 695 – 701, 1999.

SILVA, L. R. S. *Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas*. 2013.

SILVA, L.A. *SWAT applications in eastern Amazonia: A case study of the Acará Mirim and Bujaru river basin in State of Pará*. USP/EMBRAPA. Brazil, 2015.

SILVA, MADSON & SOUSA, EDICARLOS & OLIVEIRA, SONALY & DE PAULO R. DA SILVA, VICENTE. *Determinação dos parâmetros climáticos de entrada do modelo swat a partir de dados da estação agrometeorológica de Bebedouro – PE*. 2012

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. *Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, Vol. 12, No. 3, p. 258-265, 2008.

SIMÕES, FÁBIO FÉRRER. *Atualização do Modelo de Dimensionamento de Drenagem Superficial de Aeroportos*. 2000. 51 p. Trabalho de Graduação - Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

SOARES-FILHO, B.S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G., DIAZ M.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E. 2003. *Simulating the Response of Deforestation and Forest Regrowth to Road Paving and Governance Scenarios Along a Major Amazon Highway: The Case of the Santarém-Cuiabá Corridor*. Global Change Biology, submetido.

SOUZA, M. C; PEROBELLI, F. S. *Análise da distribuição territorial da sojicultura no Brasil: 1991 – 2003*. Revista Econômica do Nordeste, v. 39, 2008.

SOUZA, V. A. S. *Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SRINIVASAN, R. and ARNOLD, J.G. *Integration of the basin-scale water quality model with GIS*. Water Resources Bulletin, v.30, 1994.

TAVEIRA, I. M. L. M. *Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação*

- hidrossedimentológica da bacia representativa de sumé com o modelo swat*. UFCG, 2012.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. *Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials*. J. Soil Sci.,102:18-22, 1966.
- TEIXEIRA, G. *Amazônia: estado, exclusão social e devastação*. Brasília: Câmara dos Deputados, jun., 1998.
- TIM, U.S. *Emerging technologies for hydrologic and water quality modeling research*. Transactions of the ASAE, V.39, 1996.
- TISOT, D. A., FORMAGGIO, A. R., GALVÃO, L. S., RENNÓ, C. D. *Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral*. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, p. 439-446, 2005.
- TORRICO, J.J.T. *Práticas Hidrológicas*. 2 ed. Rio de Janeiro, TRANSCON, 1975.
- TUCCI, C. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2.ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: ABRH, 2000.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.
- USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), 2017. Disponível em: <http://agris.fao.org/>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2017.
- VALES, J. F.; SOUZA M. I. L.; NASCIMENTO, P. P. R. R.; CRUZ, D. L. S. *Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável*, 2011.
- VASCONCELLOS, M.A.SANDOVAL; GARCIA M. ENRIQUEZ. *Fundamentos de Economia*. Ed. Saraiva; São Paulo, 2009.
- VERÍSSIMO, ADALBERTO; BARRETO, PAULO; MATTOS, MARLI; TARIFA, RICARDO; UHL, CHRISTOPHER. IN. ALMEIDA, ORIANA. (ORG). *Impactos da atividade madeireira e perspectivas para o manejo sustentável da floresta numa velha fronteira da Amazônia: o caso Paragominas*. Belém: Imazon, 1996. p. 9-37.
- VERTESSY, R.A.; ELSENBEER, H. *Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment: effects of model parameterization*. Water Resources Research, 1999.
- VIEIRA, L. S.; SANTOS P. C. *Amazônia seus Solos e Outros Recursos Naturais*, Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo - S.P, 1987.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. *Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments*. 1.ed. Londres: Imperial College, 2004.
- WARRICK, A.W.; LOMEN, D.O.; ISLAS, A. *An analytical solution to Richards' equation for adrainng soil profile*. WaterResourcesResearch, 26(2):253-258, 1990.
- WILLIAMS, J. R. 1975. *Sediment Routing for Agricultural Watersheds*. Water Resources Bulletin, Mineapolois, 11(5) : 965-974, oct.
- WISCHMEIER, W, H, & SMITH, D. D. 1968. *Predicting Rainfall Erosion Losses; a Guide to Conservation Planning*. Washington, U. S. D. A. Departament of Agriculture. 62p.(Agriculture Handbook, 537)
- WU, Y., CHEN, J. 2009. *Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang River basin in South China using SWAT*. Front. Earth Sci. China. 1-6.
- YANG, J.; REICHER, P.; ABBASPOUR, K.C.; VIA, J.; YANG, H. *Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China*. Received 7 December 2007; accepted 10 May 2008. Journal of Hydrology (2008). doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.012.
- ZEILHOFER, P.; 2001. *Aplicabilidade de Mapas Topográficos 1:100.000 para a Modelação*

*de Relevo e Obtenção de Parâmetros Fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.6, n.3.

ZEN, S.; BARIONI, L. G.; BONATO, D. B. B.; ALMEIDA, M. H. S. P. de; RITTIL, T. F. (2008). *Pecuária de corte brasileira: impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa (GEE)*. Piracicaba: CEPEA, 6p. 2008. Disponível em: <[http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/Cepea\\_Carbono\\_pecuaria\\_SumExec.pdf](http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/Cepea_Carbono_pecuaria_SumExec.pdf)>

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; Model description. In: ed. *WAVES: an integrated energy and water balance model*. Canberra, CSIRO, 1998.