

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
NÚCLEO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM GEOGRAFIA**

JANIELSON DA S. LIMA

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
MUTUM PARANÁ**

Porto Velho-RO
2014

JANIELSON DA SILVA LIMA

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
MUTUM PARANÁ.**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Geografia, do Departamento de Geografia, do Núcleo de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal de Rondônia, como requisito a obtenção do Título de Mestre em Geografia na linha de pesquisa Paisagem, Natureza e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr Dorisvalder Dias Nunes

Porto Velho-RO
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

S586h	<p>Silva, Francisco de Assis de Medeiros</p> <p>Hidrelétrica, indústria e a formação do Circuito Superior da Economia Urbana em Porto Velho. / Francisco de Assis de Medeiros Silva. Porto Velho, Rondônia, 2015. 119 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Rondônia/UNIR.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gilson da Costa Silva</p> <p>1. Espaço. 2. Hidrelétrica. 3. Indústria. 4. Economia. I. Costa Silva, Ricardo Gilson da. II. Título.</p> <p>CDU: 911.3:33</p>
-------	---

Bibliotecária Responsável: Cristiane Marina Teixeira Girard/ CRB 11-897

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JANIELSON DA SILVA LIMA

A Banca de defesa de Mestrado presidida pelo orientador Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes e constituída pelos examinadores Prof. Dr. Eliomar Pereira da Silva Filho e Prof. Dr. Sérgio Luiz de Medeiros Rivero, reuniram-se no dia 22 de outubro de 2014, às 15 horas na sala Josué de Castro, Prédio do Mestrado em Geografia, sito no Campus Universitário José Ribeiro Filho, para avaliar a Dissertação de Mestrado intitulada “**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUTUM PARANÁ-RO**”, do mestrando Janielson da Silva Lima, matrícula 201210524. Após a explanação do mestrando, e sua arguição pela Banca Examinadora, a referida dissertação foi avaliada e de acordo com as normas estabelecidas pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação Mestrado em Geografia foi considerada APROVADA. Conforme determinação do Colegiado do Programa de Pós-Graduação Mestrado em Geografia, o candidato tem o prazo de até 90 (noventa) dias, a contar desta data, para realizar as correções sugeridas pela banca e entregar as cópias definitivas de sua dissertação.

Porto Velho, 22 de outubro de 2014.


Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes
Orientador


Prof. Dr. Eliomar Pereira da Silva Filho
Examinador


Prof. Dr. Sérgio Luiz de Medeiros Rivero
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Reconhecer quem o ajudou em uma caminhada é algo muito digno, demonstra humildade, amor, gratidão, honra e respeito, e isso faz com que essa parte do trabalho seja tão importante quanto às outras, então vamos às honras.

Primeiramente quero agradecer a Deus pelo fôlego de vida, pela paciência que Ele me deu, pelo intelecto e a capacidade de resolver problemas em meio à Sua infinita graça a qual eu mergulho, Ele sempre está comigo suprimindo todos os meus anseios mesmo sem eu merecer, obrigado Deus.

Quero agradecer à minha esposa, amiga, companheira, parceira, que teve paciência comigo quando eu estava estressado por conta do estudo, pelo seu amor e carinho sempre disponível a mim, pelo seu apoio, sua compreensão e seu afeto, te amo Bruna Flores.

À minha mãe, que sempre me incentiva com palavra de encorajamento, me abençoando como mãe, como amiga e que me apoia sempre que preciso, que torce por mim e me ama incondicionalmente, te amo Mãe.

À amiga, professora e coorientadora (mesmo que informalmente deste trabalho) que me incentivou, me desafiou, me apoiou, acreditou em mim e deu todo o suporte que precisei durante o processo, me deixando fazer parte e utilizando dados de um projeto o qual estava sob sua coordenação, muito obrigado Tati.

Ao Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes pela orientação, por acreditar em minha capacidade intelectual e como pesquisador, pelo seu tempo e sua disponibilidade, pelo seu incentivo desde o início das minhas atividades como PIBIC, Prof. Dosivalder, muito obrigado.

Aos amigos e colegas do LABOGEOPA, Michel e Mirthy, pela amizade e pelo companheirismo nos trabalhos de campo, à Girlane, Jean e aos demais alunos pelos momentos de descontração.

A todos o meu muito obrigado!

"Estudar as manifestações da natureza é trabalho que agrada a Deus, é o mesmo que orar. Procurar conhecer as leis naturais, glorificando o primeiro inventor, o Artista do Universo, se aprende a amá-lo, pois um grande amor a Deus nasce de um grande saber."

Leonardo da Vinci

Resumo: O uso de modelos na predição de produção de sedimento apresenta um grande potencial para serem utilizados no planejamento dos recursos hídricos, pois através desta ferramenta é possível estimar impactos causados pelas atividades antrópicas. Com base nessa premissa, utilizamos o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*) em uma bacia rural (771,2km²) localizada nos municípios de Porto Velho e Nova Mamoré, a SHBMP¹ é uma área de influência direta da usina hidrelétrica de jirau, e seu exutório está imediatamente a montante da barragem. Essa dissertação visou avaliar a aplicabilidade do modelo, simular processos hidrossedimentológicos e estimar os impactos resultantes das atividades antrópicas. A SBHMP tem sido alvo de diversas atividades que causam degradação ao meio ambiente, como atividades agropecuárias, o manejo florestal e implementação de empreendimentos hidrelétricos. Essas atividades comumente alteram a dinâmica do ambiente e o regime hidrossedimentológico, afetando não somente o ambiente físico, mas o meio social. Com a aplicação do modelo simulamos vários processos, dentre eles estimamos a produção de sedimento, sendo produzido uma média de 3,44 (ton/ha/ano), a produção de água foi estimada em pouco mais de 122 (mm/ano) os valores de vazão validados alcançaram índices satisfatórios de R² 0,84. Por fim, destacamos que o modelo SWAT, apesar de ter sido desenvolvido na Universidade do Texas (EUA), mostrou-se altamente aplicável em bacias amazônicas, tendo em vista sua boa resposta na sensibilidade dos parâmetros, e no momento da simulação dos processos hidrossedimentológicos, bem como nas simulações de cenários hipotéticos, mostrando resultados do ponto de vista teórico e metodológico altamente satisfatórios.

Palavra chave: Modelos, Bacias Hidrográficas, processos hidrossedimentológicos, Produção de Sedimento, uso e cobertura.

¹ Sub-bacia hidrográfica do Rio Mutum Paraná

Abstract: The use of models to predict sediment production has great potential for use in water resource planning, because through this tool it is possible to estimate impacts of anthropogenic activities. Based on this premise, we used the SWAT model (Soil and Water Assessment Tools) in a rural catchment (771,2km²) located in the municipalities of Porto Velho and New Mamore, the SHBMP is an area of direct influence of the hydroelectric plant of Ifo, and its discharge is immediately upstream of the dam. This thesis aimed to evaluate the applicability of the model, simulate hydrosedimentological processes and estimate the resulting impacts of human activities. The SHBMP has been the target of several activities that cause degradation to the environment, such as agricultural activities, forest management and implementation of hydropower projects. These activities commonly alter the dynamics of the environment and hydrosedimentological regime, affecting not only the physical environment but the social environment. With the application of the model we simulate various processes, among them estimate the sediment yield, and produced an average of 3.44 (ton / ha / year), water production was estimated at just over 122 (mm / year) the values validated flow reached satisfactory levels of R² 0.84. Finally, we point out that the SWAT model, even though it was developed at the University of Texas (USA), was highly applicable in the Amazon basin, in view of its good response sensitivity of parameters, and when the simulation of processes hydrosedimentological as well as in the simulations of hypothetical scenarios, showing results in terms of highly satisfactory theoretical and methodological perspective.

Keyword: Models, Watershed, Sediment Production, hydrosedimentological processes, usage and coverage.

Lista de Figuras

Figura 1 – Bacia hidrográfica e o relacionamento com a produção de sedimentos.	23
Figura 2 – Fluxograma do modelo SWAT (modificado de King <i>et al.</i> , 1996).	31
Figura 3 – Mapa Localização Área de estudo.	39
Figura 4 – Mapa Geológico da SBHMP.....	41
Figura 5 – Mapa Geomorfológico da área de estudo.	42
Figura 6 – Mapa Precipitação anual da área de estudo.....	43
Figura 7 – Mapa Pedológico da área de estudo.	44
Figura 8 – Mapa de Vegetação da área de estudo.	45
Figura 9 – Localização dos pontos de monitoramento na área de estudo.	48
Figura 10 – Equipamento de medição de vazão ADCP – M9.....	49
Figura 11 – Ciclo hidrológico simulado pelo Modelo SWAT.	51
Figura 12 - Relação entre a vazão e a precipitação no método SCS de Curva de Número	64
Figura 13 – Imagem de edição do banco de solos da SBHMP no modelo SWAT.	67
Figura 14 – Janela de entrada dos parâmetros climáticos no modelo SWAT.	69
Figura 15 – Mapa Modelo Digital de Elevação.....	72
Figura 16 – Mapa divisão das Sub bacias criadas pelo SWAT.....	74
Figura 17: Gráfico de Uso e cobertura	75
Figura 18 – Mapa divisão das Sub bacias criadas pelo SWAT.....	76
Figura 19 – Ciclo de entrada e saída da água, com base no funcionamento do modelo SWAT.....	78
Figura 20 – Gráfico boxplot com Precipitação média mensal da SBHMP.	79
Figura 21 – Gráfico de dispersão correlacionando vazão líquida observada e vazão líquida simulada do ano de 2013.	81
Figura 22 – Gráfico de dispersão correlacionando vazão líquida observada e vazão líquida simulada do ano de 2013	81
Figura 23 – Produção de água período de 2012 e 2013.....	83
Figura 24 – Produção de sedimento nos anos de 2012 e 2013.....	85
Figura 25 – Relação entre a produção de água observada com produção de sedimento simulada.....	86
Figura 26 – Gráfico de precipitação media mensal dos meses de 2012 e 2013.	87
Figura 27 – Produção de sedimento dos cenários hipotéticos.	89
Figura 28 – Gráfico da produção de sedimentos dos cenários hipotéticos.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Principais impactos ocasionados pelos sedimentos.....	25
Tabela 2 – Valores de fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno.....	58
Tabela 3 – Grupos Hidrológicos de solos.....	63
Tabela 4 – Classificação Granulométrica.....	65
Tabela 5 – Características físicas das classes de solo da bacia do rio Mutum Paraná Parâmetros Climáticos.....	68
Tabela 6 – Parâmetros estatísticos para gerador climático do modelo SWAT.	70
Tabela 7 – Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da Estação Meteorológica.....	77

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>K</i>	Fator de erodibilidade do solo	ton.ha-1
<i>K</i>	Condutividade Hidráulica	Ton há.ano ¹
<i>Ksat</i>	Condutividade hidráulica saturada	mm.d-1
<i>l</i>	Comprimento do curso d' água	m
<i>Lgw</i>	Distância do divisor da bacia do sistema Subterrâneo para o canal principal	m
<i>Lhill</i>	Comprimento do declive	m
<i>LS</i>	Fator topográfico	m
<i>lslp</i>	Comprimento da encosta	m
<i>M</i>	Parâmetro tamanho das partículas	m
<i>mareia</i>	Porcentagem de areia muito fina	%
<i>mc</i>	Porcentagem de argila	%
<i>MO</i>	Porcentagem matéria orgânica	%
<i>msilte</i>	Porcentagem de silte	%
<i>n</i>	Coefficiente de Manning	s.m-1/3
<i>n*</i>	Número de eventos	
<i>orgC</i>	Porcentagem de carbono orgânico	%
<i>P</i>	Fator de práticas conservacionistas	
<i>Pi</i>	Precipitação total	mm
<i>Peri</i>	Precipitação diária	mm
<i>Qi</i>	Escoamento superficial	mm
<i>Qlat</i>	Quantidade de água que escoou sub-superficialmente	mm
<i>qlat.i</i>	Escoamento lateral	mm
<i>Qpico</i>	Vazão de pico	m ³ .s-1
<i>qret.i</i>	Escoamento de retorno	mm
<i>Qsurf</i>	Escoamento superficial total	mm
<i>Qw</i>	Escoamento subterrâneo no canal principal	mm
<i>ra</i>	Resistência aerodinâmica	s.m-1
<i>rc</i>	Resistência de interceptação vegetal	s.m-1
<i>rsdsurf</i>	Quantidade de resíduo no solo	kg.ha-1
<i>S</i>	Parâmetro de retenção	mm
<i>SATly</i>	Quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado	mm
<i>SED</i>	Produção de sedimento	ton.d-1
<i>slp</i>	Declividade média da bacia	mm-1
<i>slpch</i>	Declividade média do curso d' água	mm-1
<i>SW</i>	Quantidade inicial de água no solo	mm
<i>SWly</i>	Conteúdo de água na camada do solo	mm
<i>SWly,excess</i>	Volume drenável de água na camada de	mm
<i>SWt</i>	Quantidade final de água no solo	mm
<i>t</i>	Tempo	dia
<i>tconc</i>	Tempo de concentração na bacia	h
<i>tcs</i>	Tempo de concentração do escoamento terrestre	h
<i>tcc</i>	Tempo de concentração do escoamento no canal	h
<i>TTperc</i>	Tempo de propagação na camada do solo	h
<i>wperc,ly</i>	Quantidade de água que percola para a próxima camada	mm

Δt	Duração do passo de tempo	d
Δ	Declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura	
λE	Fluxo de densidade do calor latente	MJ.m-2.d-1
ϕ_d	Porosidade drenável da camada de solo	mm.mm-1
γ	Constante psicrométrica	kPa.°C-1
ρ_{ar}	Densidade do ar	kg.m-3

CAPITULO 1.....	12
INTRODUÇÃO.....	12
1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	17
1.2 OBJETIVO.....	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO 2.....	19
REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE O ENTENDIMENTO DOS ESTUDOS DE	
BACIAS, OS PROCESSOS FÍSICOS E MODELAGEM AMBIENTAL	19
2.1 A atividade antrópica e suas implicações em bacias hidrográficas	19
2.2.1 Impactos Ambientais Causados Pelos Processos Hidrossedimentológicos.....	23
2.3 Modelagem Ambiental Na Ciência Geográfica.....	26
2.3.1 Caracterização do Modelo <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> - SWAT	
.....	30
2.3.2 Histórico de aplicações do SWAT	33
2.3.2.1 Trabalhos Internacionais	33
2.3.2.2 Trabalhos Nacionais.....	35
CAPÍTULO 3.....	39
3.1 Caracterização Da Área De Estudo	39
3.2 Geologia	40
3.3 Geomorfologia.....	41
3.5 Solos	43
3.6 Vegetação	44
CAPÍTULO 4.....	46
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1. Softwares utilizados.....	46
4.2 Estações De Monitoramento Hidrossedimentológica.....	46
4.2.1 Dados de precipitação	47
4.2.2 Dados de vazão	47
4.3 ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler RiveSurveyor M9	49
4.5 Base de Dados Espaciais	49
4.6 PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT	50
4.6.1 A Fase inicial do ciclo hidrológico (Fase terrestre)	50
4.6.2 Escoamento Superficial.....	52
4.6.3 Vazão de Pico.....	53
4.6.4 Tempo de concentração	53
4.6.5 Escoamento lateral	53
4.6.6 Escoamento Subterrâneo.....	54
4.6.7 Percolação	54
4.6.8 Evapotranspiração	55
4.6.9 Aporte de Sedimentos	56
4.6.10 Fator de Erodibilidade do Solo	56
4.6.11 Fator de Uso	57
4.6.12 Fator de Práticas Conservacionistas.....	58
4.6.13 Fator Topográfico	58
4.6.14 Propagação do ciclo hidrológico.....	59

4.7 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUTUTM PARANÁ	60
4.7.1 Modelo Numérico do Terreno.....	60
4.7.2 Subdivisão da Bacia Hidrográfica e as Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU).....	61
4.7.3 Dados de Uso da Terra.....	62
4.7.4 Dados Pedológicos.....	62
4.7.6 Curva Número.....	63
4.7.7 Características Granulométricas e Textuais do Solo.....	65
4.7.8 Disponibilidade de Água no Solo e Condutividade Hidráulica	65
4.7.9 Erodibilidade do solo	66
4.7.10 Parâmetros de Albedo e Conteúdo Orgânico.....	66
4.7.11 Parâmetros para o Gerador Climático.....	69
4.7.12 Tabela parâmetros estatísticos requerido pelo modelo SWAT.....	70
CAPÍTULO 5	71
RESULTADOS ALCANÇADOS COM A MODELAGEM AMBIENTAL	71
5.1 Modelo Digital De Elevação	71
5.2 Sub-divisões da Bacia do Rio Cuiabá.....	73
5.3 Uso e cobertura.....	75
5.4 Dados Tabulares de Climáticos	77
5.5 Análise da Dinâmica da Água e Sedimento na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Mutum Paraná.	77
5.6 Análise e validação da Vazão e produção de Água.....	80
5.7 Análise da simulação da produção de sedimento na Sub-bacia Mutum Paraná... 84	
5.8 Simulação de cenários hipotéticos de uso e cobertura	88
CAPÍTULO 6.....	93
CONCLUSÃO.....	89
BIBLIOGRAFIA	96

INTRODUÇÃO

No atual contexto ambiental em que vivemos a utilização dos recursos naturais sem critérios está sendo amplamente discutida, e com tudo no âmbito da tomada de decisões, poucas são as ações para que de fato possa ocorrer alguma mudança deste cenário. Na Amazônia não tem sido diferente. Os processos de ocupação se intensificaram, a utilização dos recursos em larga e pequena escala tem sido altamente explorada e sem o devido planejamento para que ocorra um gerenciamento adequado, esses recursos podem entrar em esgotamento.

O uso e o manejo inadequados dos espaços têm sido um padrão de utilização dos recursos naturais, com consequências negativas ao meio ambiente. As principais consequências desse padrão referem-se à degradação dos solos e dos recursos hídricos. Fatores como contexto socioeconômico, cultural e histórico são motivos que levam ao uso inadequado do solo. Como consequências desse uso inadequado podemos listar a queda da capacidade produtiva do solo, a degradação dos recursos hídricos, o favorecimento dos processos erosivos e a transferência de poluentes químicos, como pesticidas para os rios.

A utilização desse uso inadequado em áreas agrícolas alteram negativamente as propriedades físicas, químicas e biológicas que, por sua vez, comprometem a função básica do solo, que é a de dar suporte à vida animal e vegetal. Fatores como a compactação do solo, a redução da matéria orgânica e a alteração da estrutura do solo contribuem significativamente para acentuar o processo erosivo. Com a erosão do solo, os recursos hídricos também são afetados negativamente devido à transferência de sedimentos para os rios.

Dentro desse contexto encontra-se a SBHMP², inserida no complexo hidrográfico do Rio Madeira, localizada a noroeste do Estado de Rondônia, onde os principais problemas identificados são a retirada da floresta para atividade madeireira e implantação de atividades agropecuárias com técnicas incipientes, acarretando impactos sobre o meio ambiente.

² Sub-bacia hidrográfica do Rio Mutum Paraná

Isso nos remete ao conjunto de ações voltadas para o uso racional dos recursos naturais, e tem seu efeito evidenciado quando a escala de planejamento é a bacia hidrográfica, pois nessa escala é possível contemplar, ao mesmo tempo, diversas variáveis que influenciam direta ou indiretamente neste processo. Mediante isso, os modelos matemáticos de predição de erosão e de produção de sedimentos apresentam grande potencial para serem utilizados no planejamento racional ou sustentável dos recursos naturais. Com modelagem, torna-se possível criar cenários atuais ou futuros, onde modificações de clima, uso e manejo do solo podem ser alteradas para se estudar as respostas causadas à hidrologia, ao solo e à qualidade da água. Através da criação de cenários, é possível buscar formas de organização de uso da terra de forma sustentável.

Dentre os inúmeros modelos que vêm sendo utilizados para o planejamento de bacias hidrográficas, queremos destacar o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Este é um modelo matemático de parâmetro distribuído (quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem de espaço e/ou tempo), permitindo que um número de diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, a produção de sedimentos e a qualidade da água.

O trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, o primeiro é a introdução sobre o estudo com uma breve justificativa e objetivos do trabalho. O capítulo dois é o referencial teórico com alguns temas importantes que têm sido observados para justificar a aplicação de modelos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas. Neste capítulo, são discutidos alguns aspectos relevantes da literatura sobre a Gestão de recursos hídricos, o uso de modelos nos estudos de caráter geográfico, uma discussão sobre a ação antrópica em bacias hidrográficas, modelos hidrossedimentológicos existentes e a utilização do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos. Todos esses aspectos ajudam a compreender onde o presente trabalho se insere e quais os potenciais de aplicações do modelo SWAT como ferramenta de gestão dos recursos hídricos. No terceiro capítulo foi descrito toda a caracterização fisiográfica da área de estudo. No quarto capítulo descrevemos os materiais e métodos utilizados durante a dissertação. É incluída no capítulo a descrição do modelo SWAT, a base de dados de entrada utilizada neste estudo, além das análises estatísticas utilizadas para avaliar sua aplicabilidade. Na sequência, no capítulo cinco, são apresentados os resultados da dissertação, onde estão inseridos os resultados do monitoramento hidrossedimentológico e as análises dos dados, análise da aplicabilidade do modelo,

quanto aos processos hidrossedimentológicos da área e as correlações estáticas dos processos simulados e observados, e, por fim, as conclusões do trabalho.

1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Podemos considerar a água como um recurso natural finito, escasso e dotado de valor econômico. Para fazer uso adequado deste recurso temos que considerar aspectos ambientais, sociais e econômicos. Mediante isso também podemos afirmar que a água é vital para a existência da vida, e os processos de degradação ambiental só fazem com que esse elemento torne-se escasso, comprometendo sua qualidade, a existência da vida e o equilíbrio, assim como os diversos processos o qual ela permeia.

A intervenção humana no ambiente sem o devido planejamento através da agricultura, pecuária e manejo dos solos, resulta em processos erosivos intensos, e os prejuízos causados por estas atividades sob o ponto de vista da perda de solo e produção de sedimentos são inúmeros, contribuindo não somente para a degradação ambiental, mas consequentemente para a perda da qualidade da vida no campo.

A SBHMP é uma das áreas que tem sido alvo desses processos de degradação devido à ocupação e exploração dos recursos naturais. Em virtude das instalações das usinas do Madeira, a bacia está à mercê de um novo e diferente impacto no qual altera diretamente a dinâmica hidrossedimentológica da área estudada.

Sendo a SBHMP uma pequena bacia rural que escolhemos para nossos estudos, pois apresenta características fisiográficas, hidrossedimentológicas e de uso e cobertura do solo potencialmente vulneráveis às ações antrópicas, a quantificação da produção de sedimentos e uma análise da dinâmica hidrossedimentológica torna-se um estudo de alta valia à sociedade, beneficiando-a com técnicas de prevenção e controle de erosão que contribuem para a diminuição da perda de solo.

Deste modo, a importância da introdução de ferramentas (modelos) capazes de simular os processos que envolvem essa complexa relação entre o uso e o manejo dos solos e as alterações negativas ou positivas que possam ocorrer sob os recursos hídricos é extremamente importante do ponto de vista do gerenciamento e planejamento dos recursos naturais.

Para tanto, iremos utilizar o modelo SWAT, capaz de auxiliar na seleção de práticas eficientes aplicadas ao solo de bacias para controlar a erosão e a produção de sedimentos. Além disso, a utilização da modelagem hidrossedimentológica, a partir da inserção de diferentes cenários de uso (simulação), e manejo do solo poderá contribuir

para o planejamento do uso racional dos recursos hídricos e, posteriormente, servir de suporte à implementação de modelos no planejamento ambiental.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a aplicabilidade do modelo hidrossedimentológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para estimar os processos hidrológicos e da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica, de tal forma que permita determinar os impactos em diferentes cenários de uso da terra, subsidiando o processo de gestão dos recursos hídricos adequada para a área.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar o modelo SWAT para a bacia em estudo.
- Verificar a existência das relações entre os resultados simulados e as variáveis experimentais obtidas em campo.
- Simular cenários para a bacia de forma a estimar os diferentes impactos ocasionados por diferentes usos.
- Avaliar a utilização do modelo SWAT como ferramenta a ser introduzida no planejamento do uso e manejo de bacias hidrográficas.

REFERENCIAL TEÓRICO SOBRE O ENTENDIMENTO DOS ESTUDOS DE BACIAS, OS PROCESSOS FÍSICOS E MODELAGEM AMBIENTAL

2.1 A atividade antrópica e suas implicações em bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é uma unidade de investigação antiga no campo da Geografia Física e é definida pela área da superfície terrestre drenada por um rio principal e de seus tributários, sendo limitada pelos divisores de água, composta por microbacias e diferentes ecossistemas. Seus limites territoriais quase sempre não coincidem com as delimitações político-administrativas dos municípios, de modo que uma mesma bacia pode ser compartilhada por diferentes países, estados ou municípios (CUNHA & CUNHA, 2003).

A bacia hidrográfica é uma unidade de trabalho que possibilita ter um ponto de controle do fluxo de matérias como solo, água, nutrientes e poluentes. Portanto, a bacia hidrográfica pode ser considerada como unidade para o gerenciamento interligado dos recursos naturais.

Considerando-se a bacia hidrográfica como recorte de análise espacial, a pecuária e agricultura são as atividades potencialmente geradoras de impactos ambientais. A expansão das fronteiras agrícolas e pastagens é, em grande parte, responsável por impactos como desmatamento, queimadas em florestas e áreas de vegetação nativa, poluição por dejetos animais e agrotóxicos, erosão e degradação de solos, contaminação das águas, dentre outros (FIRMINO e FONSECA, 2008).

O desmatamento e a expansão de loteamentos em áreas impróprias, a ausência de práticas de conservação do solo e a não realização de obras com vistas ao disciplinamento das águas pluviais são alguns dos fatores que têm ação significativa na multiplicação dos processos erosivos (KERTZMAN *et al.*, 1991).

A erosão do solo é um conjunto de processos que envolvem a desagregação e o transporte que por sua vez, e quando não há mais energia para o transporte ocorre uma terceira fase denominada de deposição das partículas do solo desagregadas (MORGAN, 2005). A primeira fase normalmente é promovida pelo impacto da gota da chuva em solo desprotegido. Os materiais mais finos (argila, matéria orgânica) é desprendido preferencialmente, por serem partículas menores e mais leves. Depois de desprendido, o

material é transportado através da própria ação da gota da chuva que o arremessa para longe (salpico) e pelo escoamento superficial.

Os processos erosivos, uma vez iniciados, acarretam altos índices na produção de sedimento se não controlados, e uma vez iniciado esse processo e não controlado, tendem a evoluir e causar danos ao meio ambiente.

A depender do tipo de sedimento proveniente das áreas erodidas, o impacto gerado nos cursos de água pode se manifestar tanto através do aumento da sua turbidez, que diminui a luminosidade da água e causa problemas à fauna e flora aquática, quanto por meio do aumento da concentração de nutrientes, patógenos e metais pesados, visto que os sedimentos podem atuar como portadores desses elementos (NOVOTNY E OLEM, 1993). Além disso, o aumento da turbidez pode ocasionar a redução das atividades fotossintéticas, alterando a produtividade do sistema aquático. De acordo com o relatório publicado em 2011 pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), 25% dos solos no mundo encontram-se em estágio avançado de degradação, colocando em risco os sistemas de produção e a qualidade dos recursos hídricos.

As características antrópicas das paisagens que se encontram na área de estudo são resultado da variação política e econômica do Estado. A opção pela pecuária na Amazônia, dentre vários fatores, como a disponibilidade de terras baratas, aumento nas exportações, subsídios em créditos pelo governo, fazem da atividade o principal e seguro investimento devido à facilidade e garantias de venda (MARGULIS, 2003). De modo geral esse comportamento observado na Amazônia também é visto na SBHMP, o uso da pecuária tem sido uma constante, e em grande parte isso se deve ao baixo capital investido e ao lucro rápido assegurado pelo sistema econômico do município de Porto Velho, sendo hoje o líder da produção de gado.

Novotny e Olem (1993) argumentam que a criação de animais é atividade que pode impactar o meio de diversas maneiras. Uma criação confinada produz uma carga do tipo pontual, enquanto criações em pastagens convencionais geram uma carga de poluição difusa que será carregada pelas águas das chuvas. Além disso, a movimentação dos animais no pasto interfere na compactação do solo, diminuindo a capacidade de infiltração de água e favorecendo o escoamento superficial, podendo dar origem a sulcos e ravinas.

De acordo com Fearnside, 1993; Cavalcante 2008, a pecuária historicamente avançou do sul em direção ao norte do Estado de Rondônia, migrando principalmente,

para boa parte da sub-bacia do rio Mutum Paraná. A variação do efetivo bovino acontece no intervalo de 10 anos, entre os anos de 1995 e 2005, em virtude do estabelecimento da soja no sul do Estado.

Diante do cenário exposto, a degradação dos recursos naturais, principalmente do solo e da água, vem crescendo de forma acelerada. Do ponto de vista do uso da bacia podemos inferir que essa utilização sem critérios estabelecidos podem levar a SBHMP a um cenário de escassez. Por conta da perda da mata ciliar, essas áreas podem diminuir e até perder a capacidade de fluidez do rio em função da perda da vegetação, tendo em vista que as zonas menores da bacia são alimentadas pela condicionante vegetação, sendo que alguns córregos são frágeis, levando em consideração o aspecto da perenidade do rio, definidos como canais intermitentes alimentados apenas no período de chuvas.

Silva *et al.* (2003) destacam que fatores como o estado de conservação das matas ciliares dos cursos d'água são de extrema importância à questão hidrossedimentológica, por atuarem como barreira ao aporte de sedimento aos cursos d'água, além de filtrarem a massa d'água em situações em que a mata invade o rio.

2.2 Processos Hidrossedimentológicos Em Bacias Hidrográficas

O entendimento dos processos que ocorrem em sistemas complexos, como nas bacias hidrográficas, possibilita a orientação para gestão de uso e manejo dos recursos naturais. A sua compreensão é fundamental para uma melhor distinção de uso dos espaços indicando as áreas potencialmente sensíveis e amenizando o desgaste dos recursos naturais. Dentre esses processos destacamos o hidrossedimentológico.

Carvalho (2008) define sedimento como a partícula derivada da rocha ou de materiais biológicos por processos físicos ou químicos, que é transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem aos rios e locais de deposição. Segundo o autor, os processos responsáveis pela sedimentação são muito complexos, abrangendo erosão, deslocamento das partículas por enxurradas ou outros meios até os rios, transporte do sedimento nos cursos d'água, deposição do sedimento na calha dos rios, lagos e reservatórios e sua compactação.

De acordo com Lopes (2008) os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos, sendo a água um dos principais geradores do desprendimento de partículas de rochas e solos que irão contribuir para a produção de sedimentos da bacia.

A produção de sedimentos pode ser entendida como a quantidade de partículas erodidas que são transportadas pelo curso d'água. Tal produção acontece através da associação de eventos naturais e antrópicos que, associados a diversas variáveis, têm maior ou menor produção por área. A produção de sedimentos pode ser expressa em metros cúbicos ou em toneladas, quando referida à área da bacia, podendo ser também expressa como produção específica, em $m^3/km^2/ano$ ou $t/km^2/ano$ (PEREIRA, 2010).

A utilização irregular dos recursos naturais constitui um dos fatores que afetam o processo hidrossedimentológico em uma bacia hidrográfica, pois as ações antrópicas resultam diretamente neste ciclo, acelerando os processos erosivos, modificando as margens dos rios, aumentando a quantidade de depósitos e a instabilidade dos leitos fluviais. Como expostos por Minella (2003) e Sequinatto (2007), ambos citados por Rodrigues (2012), as atividades que mais influenciam o ciclo hidrossedimentológico em bacias hidrográficas são: o desmatamento, a agropecuária, a urbanização, a mineração, a construção de estradas, a retificação e o barramento dos cursos de água.

Nas regiões tropicais e subtropicais existe uma maior ocorrência de fenômenos intensos nos regimes pluviométricos, quando comparadas às regiões temperadas, gerando assim desequilíbrio do ciclo hidrossedimentológico que potencializa consequências ainda mais prejudiciais (TUCCI, 2005). O desequilíbrio do ciclo hidrossedimentológico aumenta as chances de assoreamento de corpos hídricos e diminui a qualidade da água, discutido por Barcelos (2005).

Bordas e Semmelmann (2001) citam que a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica pode ser dividida em três grandes conjuntos que são: interflúvios ou vertentes que constituem a área de captação e produção de sedimentos; leitos ou calhas, em que se concentra o escoamento e que têm por papel principal a propagação até a saída da bacia do complexo água - sedimentos produzidos pelos interflúvios; e planícies aluviais ou várzeas, que circulam as calhas e que funcionam como receptores dos sedimentos produzidos mais a montante quando os rios transbordam, ou como áreas fornecedoras de sedimentos no resto do tempo.

De modo geral a erosão vai diminuindo da alta para média bacia, na medida em que as declividades decrescem. Na parte baixa, há muita formação de depósitos sedimentares, isto é, a maior parte dos sedimentos erodidos se distribui pelos terrenos (FOSTER, 1995). A seguir podemos observar a figura - 01 demonstrando como funciona o processo de produção de sedimento em bacias hidrográficas.

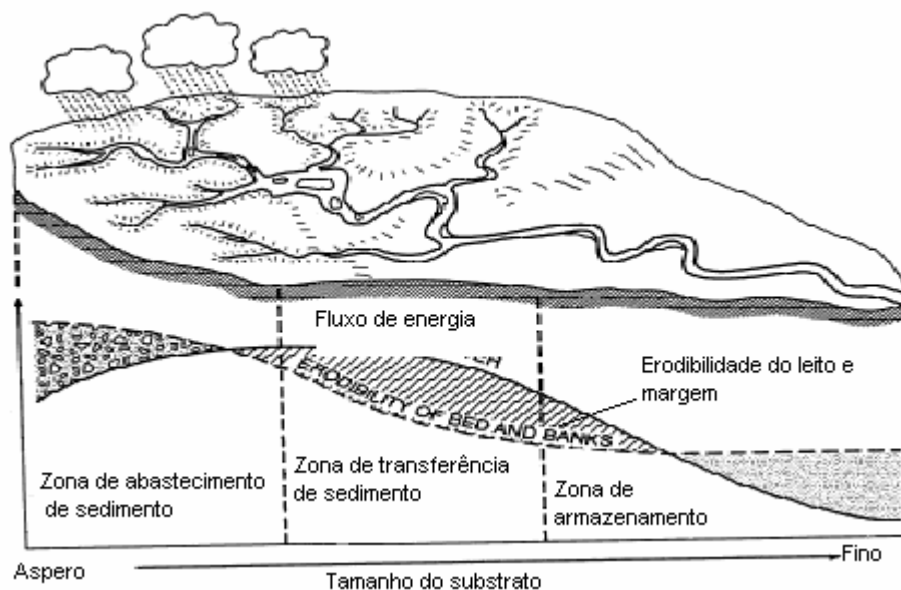


Figura 1 – Bacia hidrográfica e o relacionamento com a produção de sedimentos.
 Fonte: Modificado de Schumm (1988).

Os estudos hidrossedimentológicos se processam com lentidão, muitas vezes decorrentes de coletas regulares de dados e amostras, trabalhos de laboratório, processamento de dados e estimativas de parâmetros que são onerosos do ponto de vista de tempo e recursos, além de exigirem muito esforço. Contudo, a importância dos mesmos na gestão integrada dos recursos hídricos, os riscos de degradação do solo, dos leitos dos rios, dos ecossistemas fluviais e estuarinos ou de contaminação dos sedimentos por produtos químicos, estão impulsionando estudos que venham considerar os problemas que podem decorrer das alterações nos processos hidrossedimentológicos (CARVALHO, 1994; BORDAS e SEMMELMANN, 2000; e SILVA et al., 2003).

2.2.1 Impactos Ambientais Causados Pelos Processos Hidrossedimentológicos

Quando se trata da água de rio, o que mais chama atenção quanto à qualidade é o aspecto visual da água. Rios com grande carga sedimentar tendem a ser descartados para consumo humano. Ward e Trimble (2004) destacam que o sedimento é um poluente significativo, por sua concentração na água, os impactos que nela ocorrem e seus efeitos no transporte de poluentes.

Os autores destacam ainda que os sedimentos são os poluentes mais significativos entre todos os presentes na água, devido a sua concentração e impactos no uso da água para as diferentes atividades e necessidades humanas, (embora tenhamos outros que dão conta de um impacto bem mais crítico que o sedimento como o os

resíduos nuclear), mas a hipérbole utilizada pelo autor tem como objetivo evidenciar a gravidade dos danos causados pelo referido material ao chegar ao canal de drenagem, e dentro eles podemos salientar a redução da qualidade da água, assoreamento, enchentes e inundações. Em várias bacias hidrográficas rurais inúmeras são as causas da produção de sedimentos como lavouras, pastagens, redução das florestas, rios e o aumento de estradas, e a identificação da origem do sedimento é importante para a compreensão dos fenômenos hidrossedimentológicos existentes em uma determinada área.

De acordo com Morgan (1986) e Bordas & Semmelmann (2000), as atividades antrópicas podem alterar os processos hidrossedimentológicos por meio de ações que acabam acelerando a erosão natural dos interflúvios, os depósitos e a instabilidade dos leitos fluviais. Entre as atividades que mais afetam os processos hidrossedimentológicos destacam-se o desmatamento, a agricultura, a pecuária, o manejo dos solos e abertura de estradas.

Silva *et al.* (2003) destacam que fatores como o estado de conservação das matas ciliares dos cursos d'água são de extrema importância à questão hidrossedimentológica, por atuarem como barreira ao aporte de sedimento para os canais, além de filtrarem a massa d'água em situações em que a mata penetra no rio. Com isso a retirada da floresta altera a dinâmica da água aumentando a velocidade do escoamento superficial resultando no desprendimento e lavagem do solo, aumentando, assim, a produção de sedimento até o canal de drenagem.

Sendo assim de modo geral a carga de sedimento em suspensão nos rios é extremamente sensível às mudanças de uso da terra na bacia, independente destas ocasionarem ou não modificação no regime fluvial.

Tendo em vista a importância do entendimento e compreensão dos processos hidrossedimentológicos, torna-se altamente relevante analisar a dinâmica da água e sedimento na bacia hidrográfica e verificar como as transformações realizadas no ambiente podem causar impactos socioambientais. Perante a importância desses processos, Vestena (2008) sintetizou os principais problemas ocasionados pelos sedimentos, com base em Carvalho (1994) (Tabela-01).

PRINCIPAIS IMPACTOS OCACIONADOS PELOS SEDIMENTOS

E	1. Destruição das nascentes.
R	2. Aumenta o risco de desertificação.
O	3. Remoção da camada fértil do solo.
S	4. Desprendimento e escorregamentos de terra e taludes.
Ã	5. Altera as condições de escoamento da água na superfície e na calha dos rios.
O	6. Desbarrancamentos em rios modificam a calha e provocam depósitos no leito.
	7. Produção de sulcos em áreas indesejáveis.
	8. Comprometimento de estruturas de solos.
T	1. As partículas em suspensão degradam o uso <i>consumptivo</i> da água, aumentando o custo de tratamento.
R	
A	2. O sedimento degrada a água especificamente para abastecimento, recreação, consumo industrial, resfriamento, em hidroelétricas e vida aquática.
N	
S	3. O aumento da turbidez na água reduz a qualidade estética do curso d'água.
P	4. O sedimento em suspensão impede a penetração da luz e calor, reduzindo a atividade da fotossíntese necessária à salubridade dos corpos d'água.
O	
R	5. Quando aumenta o sedimento fino em suspensão, diminui a população de peixes nos rios.
T	
E	6. O sedimento atua como portador de poluentes, tais como nutrientes químicos, inseticidas, herbicidas, metais pesados, bactérias e vírus.
	7. A carga sólida provoca perturbação na forma do canal.
	8. O sedimento do leito dos rios, mesmo ainda em movimento, mas com redução das profundidades, pode prejudicar a navegação ou elevar o nível de água, provocando enchentes locais mais freqüentes.
	9. Colisão de areia em suspensão produz abrasão em turbinas, comportas e máquinas diversas, quando as partículas se movem em alta velocidade, produzindo redução de eficiência ou inutilizando a peça.
	10. enchentes, as pedras e seixos rolados danificam encontros e pilares de ponte, suporte de fundações de cais e canais pavimentados e outros objetos em sua passagem.
D	1. Assoreamento de reservatórios, reduzindo o volume d'água, a regularização do curso d'água, a vida útil do lago e prejudicam a navegação pela redução da profundidade ou aumentam os riscos de enchentes pela redução da capacidade do canal.
E	
P	
Ó	2. Em cursos d'água assoreados, a água em nível mais elevado provoca erosão de margens.
S	
I	3. Reduzir em alguns locais a drenagem superficial.
T	
O	4. Sedimentos depositados em canais de irrigação e de drenagem, em canais de navegação e de escoamento de enchentes, em reservatórios e portos, em ruas, estradas e edificações não somente criam transtornos mas também impõem altos custos públicos de serviço de manutenção.
	5. Quando o sedimento se deposita em áreas produtivas, diminui ou paralisa o crescimento das plantas.
	6. O sedimento fino depositado com lama e sem nutrientes afasta peixes e microorganismo.
	7. Os sedimentos depositados em diques de drenagem acabam tirando a permeabilidade do solo, além de permitir o crescimento de plantas, prejudicando o escoamento.
	8. Inundações com sedimento grosso e/ou coloidal reduzem a fertilidade dos solos.
P	1. O sedimento em suspensão reduz a ação erosiva da água no escoamento de rios.
O	2. O sedimento atua como redutor de outros poluentes, melhorando dessa forma a purificação da água.
S	
I	3. Permite que seja um meio no qual as relações químicas podem ocorrer e um meio condutor de microorganismos ou matéria orgânica diversa que melhora a fauna fluvial.
T	
I	4. Os depósitos formados nos campos podem constituir camada superior de solo fértil se tiver nutrientes. Assim como sedimentos com matéria fértil natural podem ser recuperados e utilizados benéficamente em jardins, canteiros e outras pequenas áreas de plantação.
V	
O	5. Sedimentos podem ser utilizados em aterros de áreas alagadas ou terrenos baixos.
S	6. Sedimentos de granulometria adequada são usados em construção, as argilas são usadas como impermeabilizantes; silte, areias e pedregulho, para a construção geral.

Tabela 1 – Principais impactos ocasionados pelos sedimentos.

Fonte: Vestena (2008).

2.3 Modelagem Ambiental Na Ciência Geográfica

Haggett e Chorley (1967) introduziram as bases para o uso de modelos na Geografia Física, definindo os mesmos como uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes.

Harvey (1967) definiu os modelos como uma lei, uma relação, uma hipótese ou uma equação matemática. Kirkby (1987) definiu modelo como uma abstração da realidade, e dentro da Geografia é utilizado em termos quantitativos através de equações matemáticas, geralmente através de sistemas computacionais. Mellot *et al.* (1999) salientaram que modelo é uma representação da realidade sob a forma material e simbólica.

No senso comum, um modelo traz a ideia de uma representação ideal, perfeita, sem problemas e limitações. Porém através de uma leitura mais crítica, podemos entender as limitações de um modelo, seja ele físico ou matemático; estocástico ou determinístico, concentrado ou distribuído, conceitual ou empírico.

Um modelo é uma representação do comportamento de um sistema natural possível de ser expresso através de equações matemáticas e que, dada à versatilidade que possui, pode-se facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas (BARTH; *et al.*, 1987). Todos os modelos necessitam de constante aperfeiçoamento, perante o surgimento de novas informações ou perspectivas da realidade.

Conforme Christofolletti (1999), um modelo é qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador, possibilitando a reconstrução da realidade, a previsão de um comportamento, uma transformação ou uma evolução. Não é a realidade que está representada, mas sim a nossa visão e a maneira como percebemos e compreendemos esta realidade.

Baldissera (2002) afirma que um modelo pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas, com base nos dados observados na realidade. Tucci (1998) define modelo como uma representação do comportamento de um sistema.

De acordo com os autores podemos definir modelos como uma abstração da realidade, representada através de equações matemáticas, no qual buscamos entender a complexidade do sistema. Para sua utilização é necessária prudência para entender o

processo de funcionamento do modelo a ser usado, e conhecer as limitações do modelo em representar a realidade.

De acordo com Mendes e Cirilo (2001) para representar a realidade, algumas características do ambiente são reformuladas, sendo simplificadas. Após esse processo, são extraídas conclusões que podem ser reaplicadas na realidade, a fim de melhor compreendê-la e gerenciá-la. É necessário enfatizar que o desenvolvimento de modelos e o raciocínio são inseparáveis e que a utilização desta ferramenta requer uma vigilância constante, pois os resultados ali apresentados podem trazer uma visão da realidade excessivamente formalizada e previsões inadequadas em virtude da estruturação equivocada dos dados.

Apesar deste problema, modelos são excelentes ferramentas no estudo e entendimento das interações dos processos físicos. Construindo um modelo que leve em conta as características essenciais da área de estudo e situações já ocorridas sendo reproduzidas com eficácia, temos a possibilidade de simular novos eventos, novos cenários, ou seja, podemos trabalhar com previsões. Além da vantagem da simulação de vários cenários, alia-se a esse fato o baixo custo da modelagem (MENDES e CIRILO, 2001).

Christofolletti (1999) escreve que a modelagem pode ser considerada como um instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica. Assim, a modelagem visa atender requisitos envolvidos em diretrizes metodológicas da pesquisa científica. A justificativa é que a construção de modelos ambientais representa a expressão de uma hipótese científica, a qual necessita ser avaliado sobre o sistema ambiental foco do estudo. Tal avaliação é um teste de hipóteses. Então, a construção de modelos pode ser considerada como sendo procedimento inerente à pesquisa científica e a sua elaboração deve ser realizada acompanhando os critérios e normas da metodologia científica.

Caminhando nesta mesma diversidade de definições do termo “modelo” que foi apresentada, verificou-se também, que a partir da década de 60 surgiram várias classificações de modelos, sendo que algumas dessas serão abordadas a seguir.

Hagett & Chorley (1975) classificaram os modelos em sistemas análogos naturais, sistemas físicos e sistema geral. Foi verificado que nessa classificação o autor utiliza o termo sistema como sinônimo de modelos, contudo, Christofolletti (1980, 1981 e 1999) salienta que sistema é um conjunto organizado de interações entre os elementos que interagem entre si, não permitindo simulações. Já os modelos simulam os sistemas

em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo a validação ou refutação de hipóteses.

Tomando como base os processos que contribuem para a saída do modelado, Singh (1995) classifica os modelos em concentrados e distribuídos. Os modelos concentrados analisam os processos modelados em seu conjunto, sem se preocupar com as variações espaciais, representando uma simplificação média das variáveis. Esses últimos utilizam apenas a variável tempo como independente. Já os modelos distribuídos são aqueles que levam em consideração a variabilidade espacial dos componentes e dos valores das variáveis no interior da bacia hidrográfica, como é o caso da nossa área de estudo.

Larson *et al.* (1997) destacam que as vantagens do uso dos modelos distribuídos são a maior precisão na simulação do escoamento e a representação da distribuição das áreas fontes de poluentes na superfície, melhorando a exatidão na sua identificação. Contudo, esse último autor salienta, também, que as principais dificuldades para esses modelos são a sua complexidade, volume de dados requeridos e a eficiência computacional.

Christofoletti (1999) destaca que essa complexidade do banco de dados requerido é obstáculo à formulação plenamente de modelos distribuídos, resultando, em diversas vezes, em modelos quase distribuídos. Segundo Christofoletti (1999) e Tucci (2005), na prática não existe modelo puramente distribuído, já que devido às limitações de dados de campo e experimentais, são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído concentrado numa pequena subdivisão da bacia.

Tucci (2005) propôs uma classificação dos modelos conforme o grau de discretização ou subdivisão das bacias hidrográficas, sendo: a) concentrado, b) distribuído por sub-bacias e, c) distribuídos por módulos (célula). Os modelos concentrados representam toda a bacia por uma precipitação média e os processos hidrológicos através de variáveis concentradas no espaço, sendo utilizado predominantemente para pequenas bacias hidrográficas, com mínimas variações espaciais dos parâmetros.

Os modelos distribuídos por sub-bacias são aqueles que permitem a subdivisão da bacia em sub-bacias, de acordo com o exutório de cada sub-bacia em questão, sendo utilizados em função da disponibilidade dos dados, locais de interesse e variabilidade dos parâmetros físicos da bacia. Os modelos distribuídos por módulos subdividem a

área espacial da bacia a partir de formas geométricas como quadrados e retângulos, sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizam internamente os componentes dos processos hidrológicos. Os parâmetros definidos para cada módulo nessa última classe levam em consideração características do relevo, tipologia relevo, uso e profundidade do solo, entre outros, tendo como principal problema associado, o elevado número de módulos, dificultando o melhor entendimento, por parte do usuário, da integração dos processos e ajustes dos parâmetros.

As definições e classificações apresentadas anteriormente são reflexos dos avanços na modelagem hidrológica, que ocorreram principalmente a partir das décadas de 1960 e 1970, uma vez que até então predominavam leis que descreviam os componentes dos ciclos hidrológicos, como a Lei de Darcy de 1856, o modelo de infiltração proposto por Horton na década de 30 (HORTON, 1933).

Dentre os fatores que colaboraram para avanço na modelagem, destacam-se: (i) os avanços obtidos nos conhecimentos dos processos hidrológicos; (ii) os obtidos no sistema computacional, que aumentou e redirecionou certos usos; (iii) a entrada do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, que possibilitou a representação da diversidade física da bacia hidrográfica; e (iv) a busca por resposta rápida e o baixo custo das alterações no uso e ocupação do solo, promovendo, na maioria das vezes, erosão dos solos e aumento da quantidade de sedimentos na bacia hidrográfica.

Segundo Christofolletti (1999), a maior limitação dos modelos pode ser atribuída à avaliação de sua acuidade ou o ajuste de suas previsões. Outro problema é o estabelecimento de valores aos parâmetros de um modelo e a sua correta relação com o mundo físico. Esta relação é importante, pois é a base para a transferência de um modelo da área para a qual foi criado/calibrado para outra área, ou seja, o processo de regionalização.

Um ponto importante a ser levado em consideração quando nos remetemos a esta temática é que os modelos, em hipótese alguma, podem substituir as observações de campo e os experimentos de laboratório, mas podem contribuir para o entendimento do sistema em estudo. Desta forma, possuem grande potencial para pesquisas na área de Geociências, Geografia Física e na análise ambiental, como instrumento para previsões e também como ferramenta para teoria e compreensão. Mesmo diante de suas limitações, com a contínua aplicação as dificuldades de sua implantação vão sendo gradativamente superadas (CHRISTOFOLETTI, 1999).

2.3.1 Caracterização do Modelo *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* - SWAT

O modelo SWAT (*Soil And Water Assessment Tool*) foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service e pela Texas A&M University*. O SWAT é um modelo o qual permite que diferentes processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica, com o intuito de analisar os impactos oriundos das alterações de uso do solo, sobre o escoamento superficial e subterrâneo, em bacias hidrográficas não instrumentadas (ARNOLD; ALLÉN. 1996).

De acordo com Neitsch et al. (2005), o SWAT é um modelo que tem como característica de ser base física, que requer informações quanto ao clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo e gerenciamento da terra e sua devida execução. Sua primeira característica nos mostra sua capacidade de simulações e bacia sem monitoramento, ou seja, sem calibração, favorecendo resultados realistas. O modelo utiliza dados normalmente disponíveis, capaz de simular bacias de diferentes tamanhos com estabelecimento de diferentes cenários e é um modelo contínuo no tempo, favorecendo as simulações de longos períodos.

O modelo SWAT deriva de diversos outros modelos, tais como: o SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), QUAL2E e ROTO (*Routing outputs To outlets*) foram diretamente adaptados para a criação do SWAT. O SWRRB foi originado através da junção das funcionalidades dos modelos GLEAMs (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*), além de diversas modificações que proporcionaram maior avanço para realizar as simulações.

O modelo foi concebido já com uma vasta gama de experiência intrínseca, tendo em vista que tais modificações, agregadas pelo diversos modelos, foram realizadas visando um aperfeiçoamento do mesmo, com intuito de representar a enorme complexidade dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (GASSMAN et al, 2007).

Desde seu surgimento, o SWAT sofreu adaptações para algumas áreas específicas e foi integrado a um sistema de informação geográfica. Em relação ao SIG, foi desenvolvido para a primeira versão do SWAT um interface com o ArcView, possibilitando a entrada de banco de dados, a elaboração e edição de cenários ambientais e sua representação em forma de gráficos e mapas, controle e simulações,

extrair e reorganizar as saídas do modelo (MARCHIORO, 2008). A seguir na figura 02 podemos observar o processo de funcionamento do modelo.

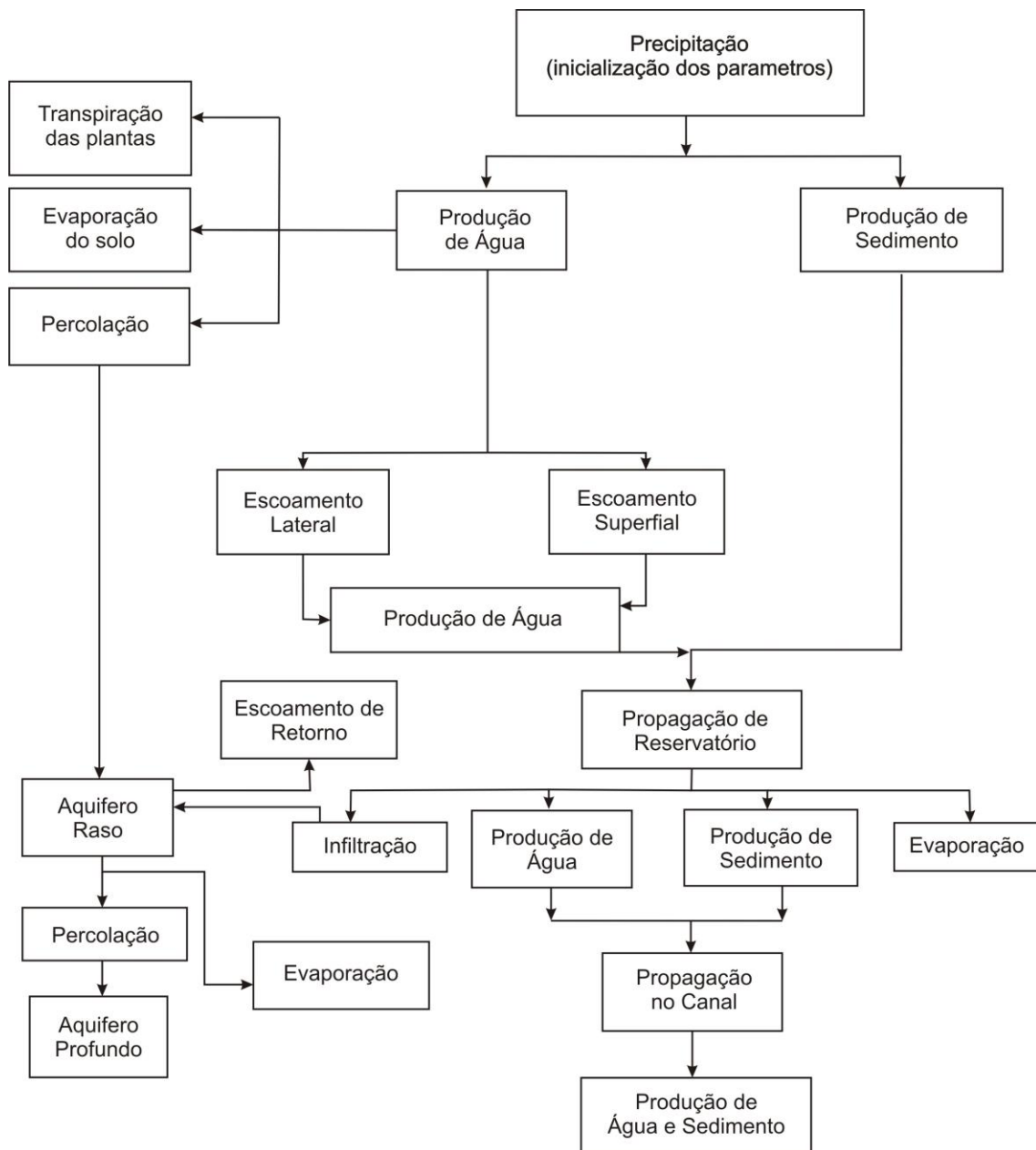


Figura 2 – Fluxograma do modelo SWAT (modificado de King *et al.*, 1996).

O modelo requer, necessariamente, três diferentes arquivos geoespaciais: modelo digital de elevação, mapa de solos e de uso do solo. Dados tabulares referentes às condições climáticas também são requisitos básicos para simulação de uma determinada bacia (NEITSCH *et al.*, 2005).

O SWAT permite a divisão da bacia em sub-bacias, podendo ser parametrizadas usando o conceito de unidades de respostas hidrológicas (*Hydrologic Response Units* –

HRUs), permitindo refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal e topografia. Subdividir a bacia nos possibilita ter combinações únicas para refletir sobre o resultado apontado pelo modelo e suas possíveis diferenças que possam transparecer as distintas condições hidrológicas para diferentes culturas e tipo de solo.

O SWAT é baseado em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimento e agroquímicos através da bacia. O modelo requer dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (NEITSCH *et al.*, 2005).

Em sua estrutura, o modelo SWAT incorpora oito componentes³ principais para prover suas simulações. São eles (DHAR, 2009 e NETO, 2011):

- Hidrologia escoamento: superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem. Incluindo ainda a análise em reservatórios;
- Aporte sedimentos: abrange o ciclo hidrossedimentológico, utilizando a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MEUPS);
- Clima precipitação: umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar;
- Temperatura do solo: o modelo simula diariamente uma temperatura média no centro de cada camada do solo com objetivo do uso nos processos hidrológicos e no declínio de resíduos orgânicos;
- Crescimento vegetal;
- Nutrientes: investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e do fósforo;
- Pesticidas e bactérias: investiga o movimento de tais elementos, analisando a biodegradação e transformação dos pesticidas, além do declínio de bactérias. O modelo pode ainda acompanhar a existência de metais pesados, contudo sem analisar possíveis transformações.
- Práticas agrícolas: analisa o cultivo de cultura considerando irrigação e o manejo de resíduos na terra.

³ Estes componentes podem ou não serem simulados, variam de acordo com o critério e a necessidade do usuário do modelo.

2.3.2 Histórico de aplicações do SWAT

2.3.2.1 Trabalhos Internacionais

O modelo SWAT tem sido amplamente utilizado, tanto no âmbito internacional quanto no ambiente nacional por agências, pesquisadores, cientistas, profissionais liberais, empresas privadas e diversas esferas que atuam na área ambiental.

De acordo com Gassman (2007) há diversas possibilidades que o modelo SWAT possui, levando à sua escolha por diversas agências governamentais nos Estados Unidos e União Européia. Uma das grandes aplicações do modelo se deu através do projeto HUMUS (Hydrologic Unit Model of US), na qual se buscou simular os processos hidrológicos, poluição e outros impactos devido ao uso de água na agricultura e municípios nas 2.149 unidades hidrológicas catalogadas pelo USGS (US Geological Survey).

O modelo SWAT também foi escolhido pelo departamento de agricultura dos Estados Unidos para o Projeto de Análise dos Efeitos da Conservação na Agricultura, no qual visa estimar os impactos ambientais benéficos das práticas de conservação em escala nacional e em nível de bacias hidrográficas.

Na Europa foi um dos modelos utilizados para verificar o impacto das mudanças climáticas em cinco bacias hidrográficas. Em outro projeto europeu foi usado para verificar a capacidade do modelo em estimar fontes não-pontuais de nitrogênio e fósforo (GASSMAN, *op. cit.*, 2007).

Quanto à produção de sedimentos, excluindo situações de pico, o WEPP⁴ respondeu superestimando e o SWAT subestimando. Com isto, foi possível indicar o melhor desempenho do WEPP perante os dois processos analisados, obtendo valores de coeficiente de Nash⁵ para os períodos de calibração e validação, na ordem de 0,8 para produção de escoamento superficial e sedimentos, enquanto que o SWAT obteve valores entre 0,6 e 0,8. Concluiu-se que ambos os modelos ofereceram bons resultados em nível mensal diante das suas respectivas limitações.

Outro interessante trabalho foi realizado por Shen (2009) no qual se buscou comparar o desempenho dos modelos WEPP e SWAT perante uma pequena bacia hidrográfica, de cerca de 1,6 km², contribuinte para o reservatório de Três Gargantas, na China. Esta bacia possui precipitação média anual na ordem de 1440 mm e possui área

⁴ O modelo do WEPP (Water Erosion Prediction Project) é um processo orientado para a simulação computadorizada contínua, que pode ser aplicada para perfis de taludes e encostas ou bacias hidrográficas (FLANAGAN e NEARING, 1995).

⁵ Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, amplamente utilizado na calibração e ajuste de modelo.

predominante de cultivo de arroz, amendoim e citrus. O autor verificou o desempenho de ambos os modelos perante a produção de escoamento superficial e sedimentos utilizando o coeficiente de Nash. No que diz respeito ao escoamento, observou-se que o WEPP responde melhor quando há baixos valores de escoamento superficial observado, enquanto que o SWAT subestima picos de fluxo superficial.

Govender e Everson (2005) aplicaram o SWAT em duas pequenas bacias na África do Sul. Porém, apenas na primeira delas, com área de 0,677 km² e vegetação predominante rasteira, foi realizada uma avaliação do desempenho do modelo. O autor enalteceu o coeficiente de determinação encontrado de 0,65 por ajustes manuais, enfatizando que o modelo foi inicialmente desenvolvido para grandes bacias. Verificou que o desempenho do modelo foi melhor para anos secos que para anos úmidos, havendo nestes últimos uma subestimativa dos picos de escoamento superficial. Por fim, o autor ressalta a necessidade de aplicação do modelo para grandes bacias no país, a fim de ajudar nos processos decisórios quanto ao manejo e uso do solo.

A análise de sensibilidade é um passo importante no processo de calibração do modelo, identificando os parâmetros que levam a um melhor entendimento do modelo e do seu desempenho e, por consequência, reduz as incertezas intrínsecas ao processo de simulação (LENHART, *et. al* 2002).

Lenhart (*op. cit*) utilizou uma microbacia virtual, em formato de “V”, para efetuar uma análise de sensibilidade em 41 parâmetros para todas as respostas do modelo SWAT. Mesmo consentindo com o fato de que em bacias reais e maiores alguns parâmetros fornecerão comportamentos diferentes para as respostas, este trabalho fornece direcionamentos básicos quanto ao peso de cada parâmetro na simulação.

Cibin *et. al* (2010) identificaram 13 parâmetros que mais afetam o fluxo nos canais, divididos entre os processos de água subterrânea, escoamento superficial, evapotranspiração e rugosidade da superfície. Destes, quatro parâmetros regem o escoamento superficial (valor da “Curva-Número”, declividade média da bacia e por sub-bacia e o coeficiente de atraso do escoamento superficial), seis regem a água subterrânea (coeficiente de atraso do fluxo de base e da recarga do aquífero, coeficiente de “revap”, valor limite para propiciar recarga pelo aquífero, condutividade hidráulica do solo e capacidade de água disponível) e dois regem a evapotranspiração (coeficiente de evapotranspiração do solo e capacidade de água disponível).

O trabalho de Cibin (2010) mostrou ainda que o modelo SWAT possui um efeito de escala para alguns de seus parâmetros, variando assim sua influência nos resultados

para diferentes áreas de bacias. E, não menos importante, o autor constatou dependência de alguns parâmetros em função da lâmina precipitada no período simulado.

Dentre os 13 parâmetros apontados por Cibin (*op. cit*), Green (2008) utilizou quatro parâmetros, dos quais apenas um não listado no primeiro trabalho, para calibrar seis pequenas bacias hidrográficas. Tais bacias possuem área entre 4 e 8,4 hectares, com plantação uniforme de milho e/ou trigo e declividade suave – variando entre 1,1 a 3,2%. Foram investigados os valores de Curva Número, o coeficiente de evapotranspiração do solo e o coeficiente de atraso do escoamento superficial, além de um fator que expressa a capacidade de campo. Os coeficientes de Nash e de determinação obtidos foram superiores a 0,8 para a produção de escoamento superficial – seja para verificação mensal e diária. Por outro lado, na análise da produção de sedimentos, tais coeficientes não foram tão bons, sendo o coeficiente de Nash entre valores de 0,46 a 0,6 (havendo para uma sub-bacia o valor negativo de 2,92) e o de determinação entre 0,44 a 0,74. Em conclusão, o autor verificou a alta sensibilidade do modelo apresentado para os parâmetros Curva-Número e o coeficiente de evapotranspiração do solo.

Arabi *et. al* (2008) avaliou as respostas de sete práticas de manejo do solo na agricultura, na parte alta da bacia, e três técnicas de coberturas de canal em uma pequena bacia (7,3 km²) frente à produção de escoamento superficial, sedimentos, nutrientes e pesticidas. Seus resultados tornaram possível a observação da sensibilidade do modelo perante os diferentes manejos, e com isto apontar as melhores práticas para a conservação do solo.

Arnold e Allen (1996) utilizaram o SWAT para simular os processos hidrológicos em três bacias do centro do estado de Illinois (EUA), com áreas entre 122km² e 246km², cujo uso do solo era predominantemente milho, soja e pastagem, objetivando testar o desempenho do SWAT para prever escoamento superficial e subterrâneo, tanto mensal quanto anual. Neste trabalho foi verificado um bom ajuste do modelo, fato comprovado pelo R² que atingiu 0,94 e pelo aspecto visual do hidrograma de saída.

2.3.2.2 Trabalhos Nacionais

O primeiro trabalho que se tem notícia no Brasil foi realizado por Oliveira em um estudo hidrossedimentológico na região costeira do Rio Joanes (1999), localizado no recôncavo baiano; desde então se observa um aumento progressivo de trabalhos publicados que utilizaram o modelo. De 1999 até 2010 foram registrados 74 trabalhos

publicados, 60 deles como artigos e 14 em teses e dissertações, sendo que 51% destes trabalhos são sobre os estados de São Paulo (19%), Santa Catarina (16%) e Paraná (16%) (GARBOSSA, *et. al* 2011).

O trabalho realizado por Lopes (2008) teve como objetivo principal de analisar o equilíbrio hidrossedimentológico em sete microbacias hidrológicas experimentais no Estado de Santa Catarina. Com precipitação média anual variando entre 1300 a 1900 mm, as microbacias apresentavam áreas predominantemente uniformes de vegetação nativa, reflorestamento de pinus, agricultura e mista. O desempenho do modelo mostrou-se pouco satisfatório, observando-se valores negativos do coeficiente de Nash⁶ e grande flutuação do valor de R², para o processo de calibração manual e automático. Por outro lado, a produção de sedimentos não foi verificada com dados reais, e a resposta do modelo forneceu subsídios para se concluir que o estabelecimento de áreas de preservação ao longo dos cursos d'água e a aplicação de práticas conservacionistas na agricultura são medidas suficientes para o controle da erosão, para este caso.

Porém, não podemos afirmar que somente medidas como essas são suficientes para reduzir o controle de erosão, pois ela não é apenas o resultado de uma determinada prática, mas sim um processo resultante de diversos condicionantes que estão imputadas no ambiente.

Baldisserra (2005) testou a aplicabilidade do SWAT na bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, comparando a vazão observada e a simulada pelo modelo sob diferentes cenários definidos em função da construção de uma barragem naquele rio e do uso e ocupação do solo na referida bacia. Com aproximadamente 29.000 km², a bacia do Rio Cuiabá foi dividida pelo modelo em 34 sub-bacias. A autora ainda realizou simulação encarando dois cenários: o primeiro representativo da realidade da bacia e um segundo tomando a existência de apenas vegetação nativa de toda área (“cenário ideal”).

(OLIVEIRA, 1999) aplicou esse modelo na bacia hidrográfica do rio Jones, na Bahia (755,4 km²), para estudar as alterações hidrossedimentológicas provocadas pelos diferentes usos e ocupações no solo nessa bacia. Nesse trabalho, o autor constatou, ao final dos seus estudos, que a redução da vegetação nativa e o aumento da urbanização incrementaram as perdas de solo em aproximadamente 17% durante 13 anos de simulações. Dessa forma, os resultados obtidos permitiram avaliar de forma quantitativa

⁶ As estatísticas mais comumente utilizadas para a verificação entre dados observados *versus* estimados residem em tratamentos estatísticos, associados ao: erro padrão, coeficiente R², coeficiente de Nash e Sutcliffe, diferença ou variação de volumes e o fator da curva de permanência (TUCCI, 2005).

os efeitos da alteração no uso do solo devido à substituição da vegetação nativa por outras de coberturas diversas, bem como os efeitos da urbanização na bacia hidrográfica.

Uzeika (2009) buscou verificar a aplicabilidade do SWAT na microbacia hidrográfica de Arvorezinha, Rio Grande do Sul, de apenas 1,19 km², investigando os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos sem calibração do modelo. Após analisar o modelo para as condições reais de cobertura de solo para três diferentes anos, a autora estabeleceu três cenários: floresta nativa, a condição do solo para o ano de 2006 e o terceiro cenário estabeleceu apenas uma diferença quanto ao manejo do solo frente ao cenário anterior. Os resultados mostraram que o escoamento superficial foi pouco sensível aos cenários dois e três, enquanto que o segundo cenário apresentou-se cerca de 40% superior ao terceiro quanto ao aporte de sedimentos. Diante disto, percebe-se a relevância das práticas de manejo do solo para o estabelecimento de medidas de controle de erosão, como também a capacidade de assimilação do modelo com respeito a práticas de conservação. Por outro lado, o primeiro cenário não apresentou volumes significativos de escoamento superficial, tampouco de produção de sedimentos. Para tal fato, a explicação plausível foi a superestimação da evapotranspiração devido a totalidade da cobertura do solo por floresta.

Moro (2005) utilizou o SWAT para a identificação de diferentes respostas para onze diferentes cenários submetidos à microbacia hidrográfica de Ribeirão Martins, de 59,73 km². Os cenários permeavam inversões na cobertura do solo, a perspectiva de apenas um cenário ocupando toda a área e o estabelecimento de coberturas do solo tomando como base a declividade do terreno. Diante do seu experimento, a autora verificou que a vegetação nativa proporcionou redução significativa nos processos erosivos.

O processo de outorga de água para uma grande bacia foi analisado por Souza (2009), uma vez que o volume estipulado para concessão de outorga se dá através de medição localizada no exutório de toda área de drenagem. Com isto, tem-se a possibilidade de superestimar o valor real da vazão passível de outorga nas diversas sub-bacias. Assim, a delimitação efetuada encontrou 47 sub-bacias na bacia do Altíssimo Rio Negro localizada na divisa do estado do Paraná e Santa Catarina, com 787 km², encontrando-se um bom coeficiente de Nash (0,72). O satisfatório desempenho do modelo mostrou que o valor da vazão outorgada não é atingido em diversas sub-bacias. Assim, a aplicação deste modelo hidrológico distribuído, integrado

a um SIG, proporciona conhecimento suficiente para que a concessão de outorga aconteça de forma mais precisa respeitando os tributários de um rio principal.

Em um projeto desenvolvido pela Universidade Federal da Bahia, em 2004, destaca-se a aplicação do modelo SWAT em região semiárida daquele Estado, na bacia do Rio Salitre. Nesse projeto, o objetivo era fundamentar e orientar a implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos de forma adequada às regiões semiáridas. Para tal, buscou-se calibrar e validar o modelo, atingido resultados satisfatórios, e, por mais que as vazões máximas fossem superestimadas pelo modelo, os resultados foram cruciais no processo de tomadas de decisões para a gestão da água na região.

3.1 Caracterização Da Área De Estudo

A SBHMP é uma sub-bacia pertencente ao complexo hidrográfico do rio Mutum Paraná, que por sua vez é uma sub-bacia do rio Madeira. A área de estudo está localizada em uma área rural, no extremo noroeste do Estado de Rondônia, Brasil, inserida nos municípios de Porto Velho e Nova Mamoré, com coordenadas geográficas: 9°35'6" S a 11° 26'24" S e 64°29'6" W a 65°23'6" W, com aproximadamente 771,2 Km² de área, como ilustra a Figura 04 a seguir:

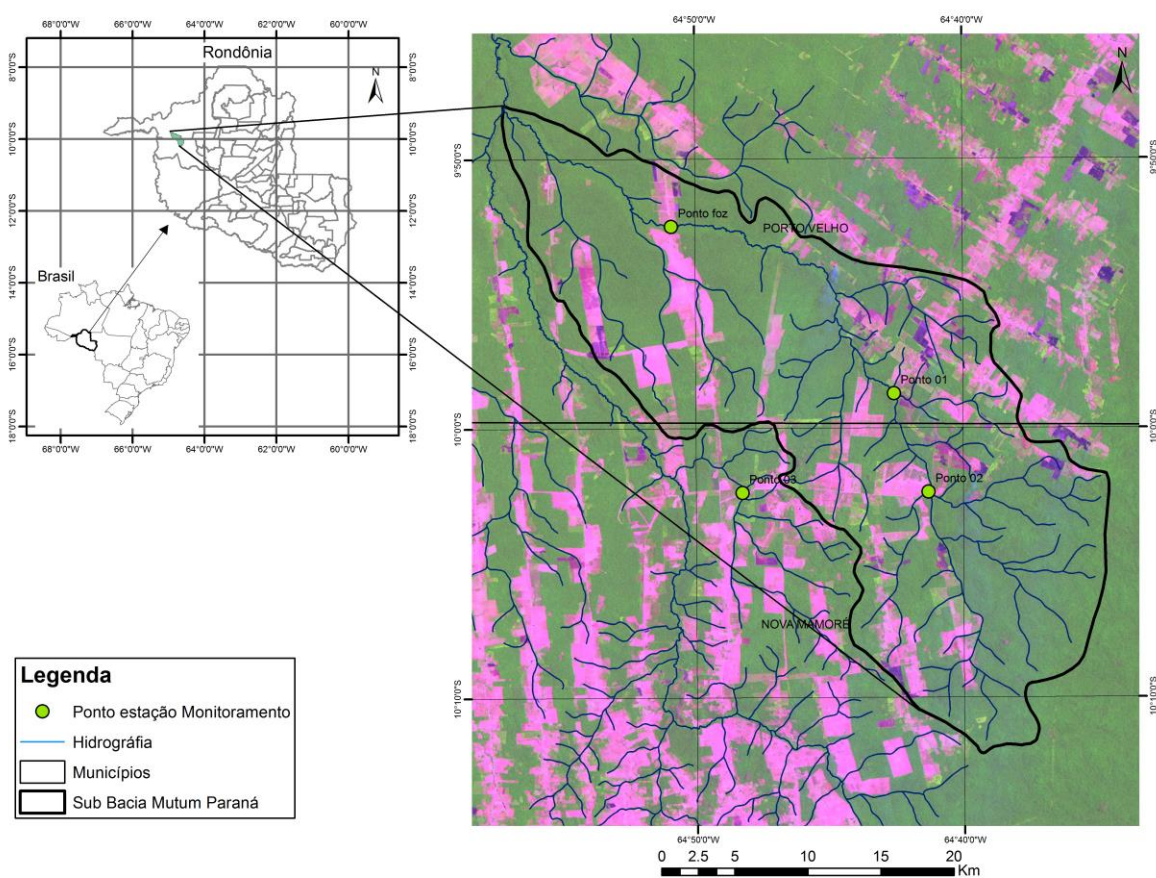


Figura 3 – Mapa Localização Área de estudo.
 Fonte: SEDAM/INPE
 Organizado por Janielson da Silva Lima

3.2 Geologia

De acordo com os dados das bases cartográficas do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2007) a geologia da área de estudo apresenta cinco unidades geológicas distintas, os dados aqui expostos estão na escala de 1:250.000, essas são as informações geológicas mais recentes e de maior detalhe de análise disponível para a área de estudo.

A SBHMP apresenta Depósitos Aluvionares Q2a (a): são depósitos arenosos, siltosos e argilosos, com níveis de cascalho, compatível em ambiente fluvial. Também é constituída de Depósitos Argilosos Q2ag (ag): são depósitos argilosos e siltico-argilosos inconsolidados, ricos em matéria orgânica, relacionados a planícies de inundações.

Ainda de acordo com o Serviço Geológico do Brasil, o centro da bacia predomina Cobertura Sedimentar indiferenciada NQi (i): são depósitos de areia, silte, argila ou cascalho, com restos de materiais lateríticos (horizontes mosqueado e argiloso, além de crosta laterítica ferruginosa). Apresentam também sedimentos aluvionares, coluvionares e eluvionares indiferenciados, recobertos por cobertura de solos indiscriminados.

Suíte Laje MP2gamma_1 (l): São granitos leucocráticos que intrudem paragneisses e xistos e dos quais derivam, em parte, por anatexia, são descritos também como granitos sintectônicos foliados, de granulação média, equigranulares e de textura granoblástica e porfiroblástica homogênea e secundária. Variam de cinza-claro a esbranquiçado e possuem pontuações pretas dadas por aglomerados de biotita ou avermelhadas definidas por porfiroblastos de granada. Seus constituintes essenciais compreendem Kfeldspato, quartzo, granada, biotita e plagioclasio. De acordo com alguns pontos, a nordeste e a sudeste da bacia possui a Suíte Intrusiva da Providência MP1gammap (p): é composta por granito rapakivi (anfíbólio-biotita monzogranito, biotita sienogranito). Apresenta também charnockito, mangerito e rochas máficas associadas, variando de isotrópica a foliada (foliação de fluxo magmático e milanítica). Na figura 04 podemos observar o mapa de geologia da área de estudo.

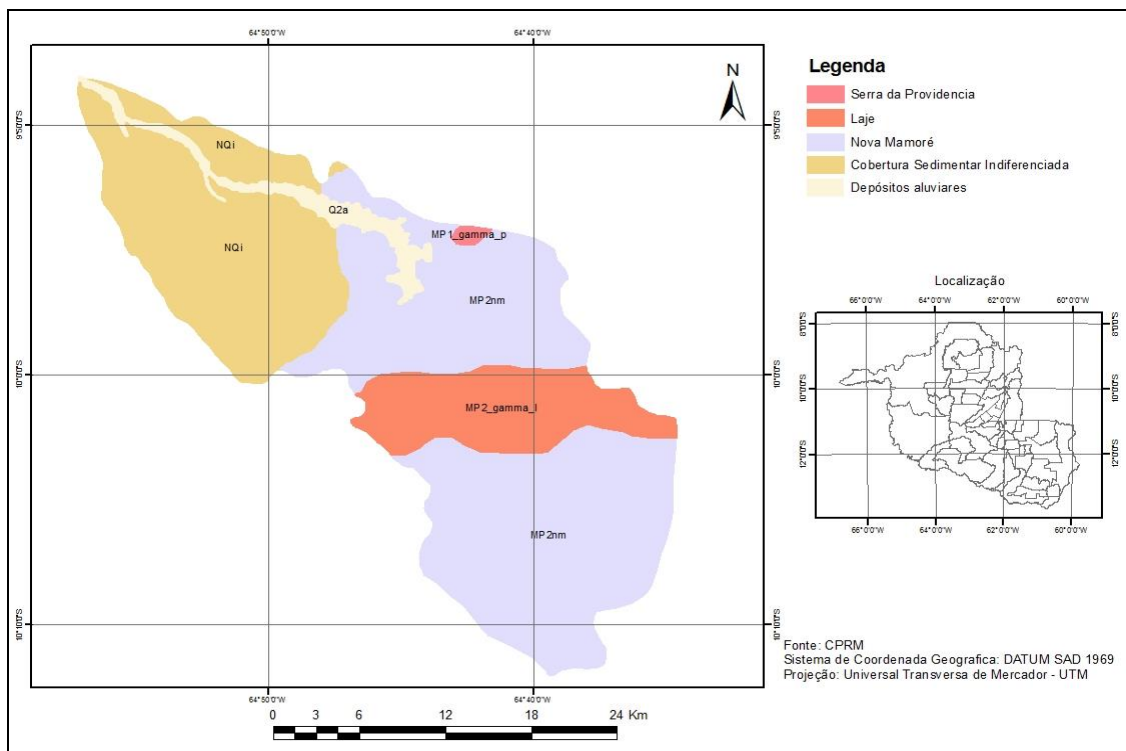


Figura 4 – Mapa Geológico da SBHMP.
Organizado por Janielson da Silva Lima

3.3 Geomorfologia

As características geomorfológicas que constituem a SBHMP são as planícies aluvionares constituídas por terrenos inundáveis e vales e as Unidades Denudacionais constituídas pelas superfícies de aplainamento. As planícies aluviárias são o conjunto de unidades geomorfológicas, sendo geneticamente originados por processos agradacionais, realizados, neste caso, em ambientes fluviais na sua maioria e eventualmente por processos lacustres ou associados a áreas com escoamento impedido.

As Planícies Inundáveis segundo Guerra & Cunha (1996) são banquetas pouco elevadas acima do nível médio das águas sendo frequentemente inundadas por ocasião das cheias. A Superfície de Aplanamento Nível II apresenta-se abaixo dos 300 metros com dissecação média e nenhum ou esporádicos Inselbergs e tors. A principal característica deste aplanamento é o arrasamento generalizado dos materiais de cobertura do cráton, com exposição do embasamento cristalino, composto por rochas granítico-gnáissicas. Este Sistema apresenta todas as características de um aplanamento em ambiente árido ou semiárido, pois além de uma superfície sub-horizontalizada, encontram-se vestígios de formações superficiais (linhas de pedra) e depósitos conglomeráticos de ambiente torrencial.

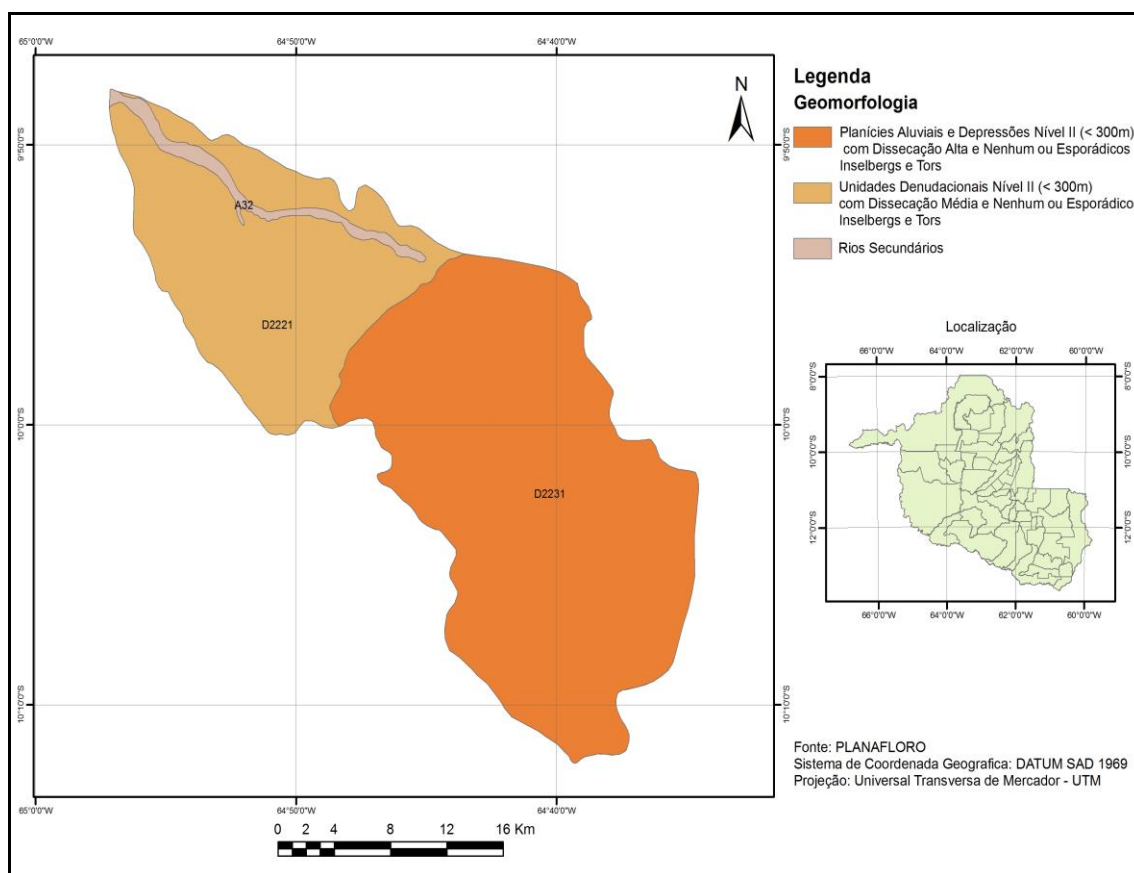


Figura 5 – Mapa Geomorfológico da área de estudo.
Organizado por Janielson da Silva Lima

3.4 Clima

Rondônia possui, como toda região úmida da Amazônia, clima equatorial, com microclima controlado durante o ano, principalmente por fracos domínios anticiclônicos (que embora originários de ventos divergentes das latitudes tropicais do Atlântico Norte e Sul, suas propriedades são muito transformadas pela sua longa permanência sobre a superfície quente florestal da Amazônia) e por sistemas de massas de ar originárias das latitudes baixas da zona equatorial.

Ao caso da SBHMP, o clima é caracterizado de acordo com a classificação de Köppen, como sendo Aw – clima tropical chuvoso, onde as taxas de temperatura média do mês mais frio são superiores a 18°C (megatérmico), e um período ecologicamente seco, e sujeito a altos desvios pluviométricos ao longo dos anos. Durante a estação de inverno ocorre no estado um moderado déficit hídrico com índices pluviométricos inferiores a 50 mm/mês (RONDÔNIA, 2002). No decorrer do ano, a área de estudo apresenta variação nos índices pluviométricos. Tendo áreas com chuvas anuais de 1800

a 1900 mm o que assegura chuvas intensas em pequenos períodos do ano (SUDO, 1974; NIMER, 1989; RONDÔNIA, 2001).

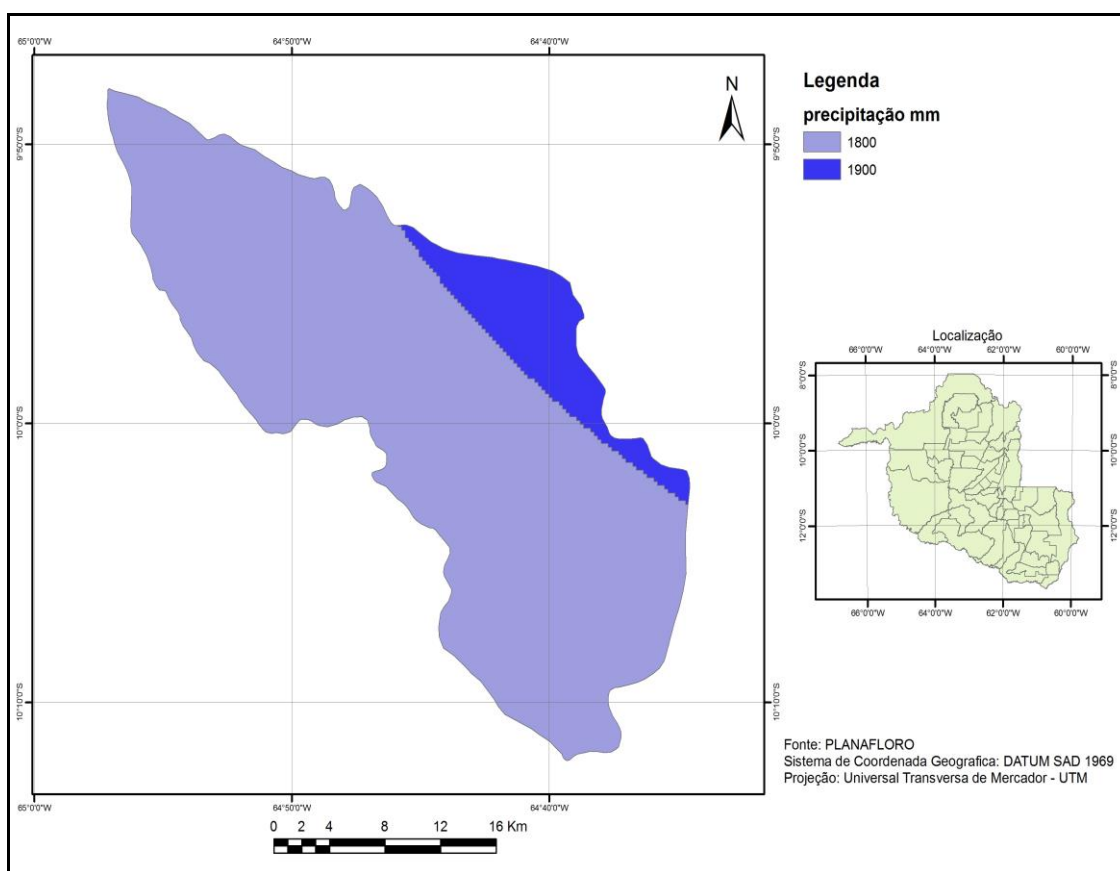


Figura 6 – Mapa Precipitação anual da área de estudo.
Organizado por Janielson da Silva Lima

3.5 Solos

De acordo com PLANAFLORO, 2001, encontramos três manchas distintas das características pedológicas da área de estudo, são elas:

Os Latossolos Amarelos Distróficos apresentam textura variada em alguns pontos entre média e argilosa, com relevo plano a suavemente ondulado e ligeiramente pedregoso, solos envelhecidos que podem variar de ácidos a fortemente ácidos. As outras duas manchas foram de Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos no qual as diferenças existentes entre elas seriam teores de argilas e um modelado de relevo distinto com tudo de modo geral. São solos que tem com características minerais profundos, com horizonte B latossólico e estrutura granular, tem como característica uma textura média a muito argilosa e relevo plano. Apresentam, também, limitações moderadas na produção para um determinado tipo de utilização. Assim, esta limitação

reduz a produtividade e os benefícios elevando a necessidade de insumos. Essa classe de solo tem a saturação por base baixa ($v < 50\%$), o que significa baixa fertilidade natural.

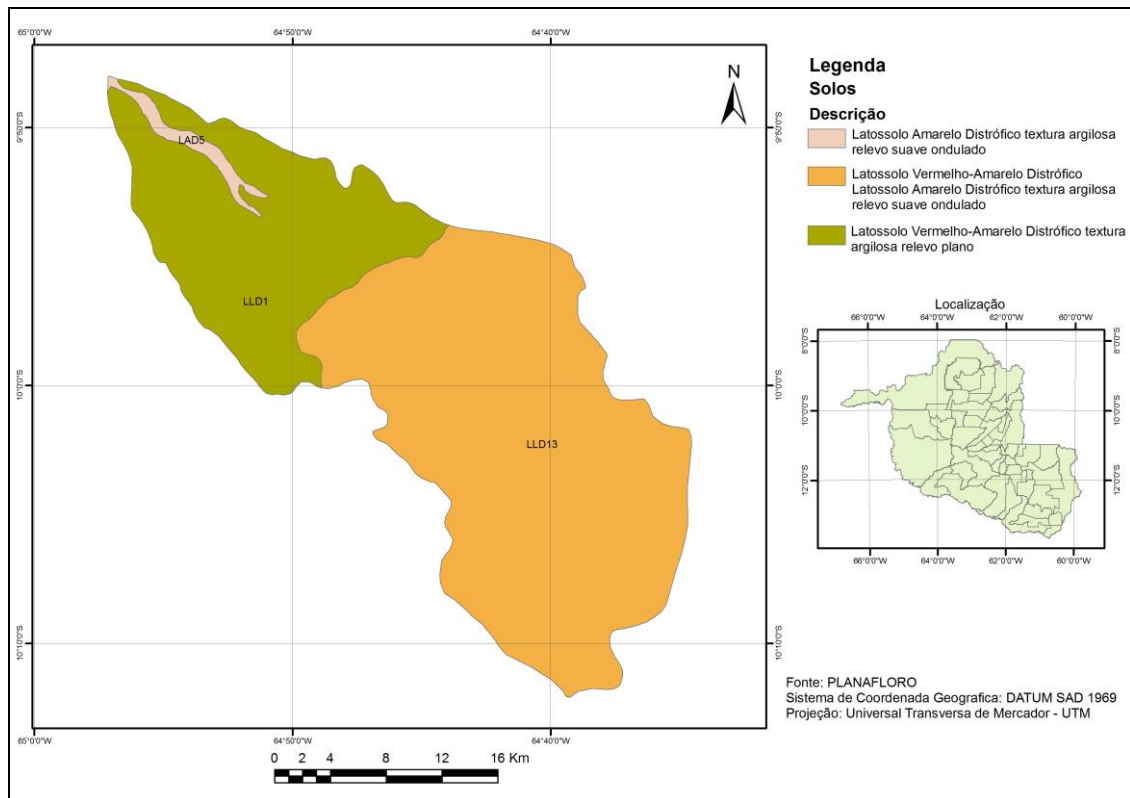


Figura 7 – Mapa Pedológico da área de estudo.
 Organizado por Janielson da Silva Lima

3.6 Vegetação

No Estado de Rondônia a vegetação é reconhecida pela grande diversidade de espécies. Este fato ocorre por ser uma área de transição entre o domínio geomorfológico do Brasil Central e o domínio geomorfológico Amazônico, sendo, portanto, considerado uma área que congrega três importantes biomas: Floresta Amazônica, Pantanal e Cerrado. Com base em PLANAFLORO (2001), os tipos de vegetação encontrados no Estado de Rondônia foi a Floresta ombrófila, essa classe de vegetação é caracterizada por serem típicas de floresta tropical úmida, possui dossel descontínuo, associada a palmeiras, cipós e bambus, ocorre sobre solos Latossolos, Argissolos, predomina na área como Floresta Ombrófila a de Terras Baixas, ocorrendo em altitudes que variam de 5 até 100 metros, e Floresta Ombrófila Aberta Submontana, em altitudes entre 100 até 600m. Constituem formações típicas da zona intertropical, caracterizadas por fanerófitos variando de macro e meso com presença abundante de lianas lenhosas e epífitos.

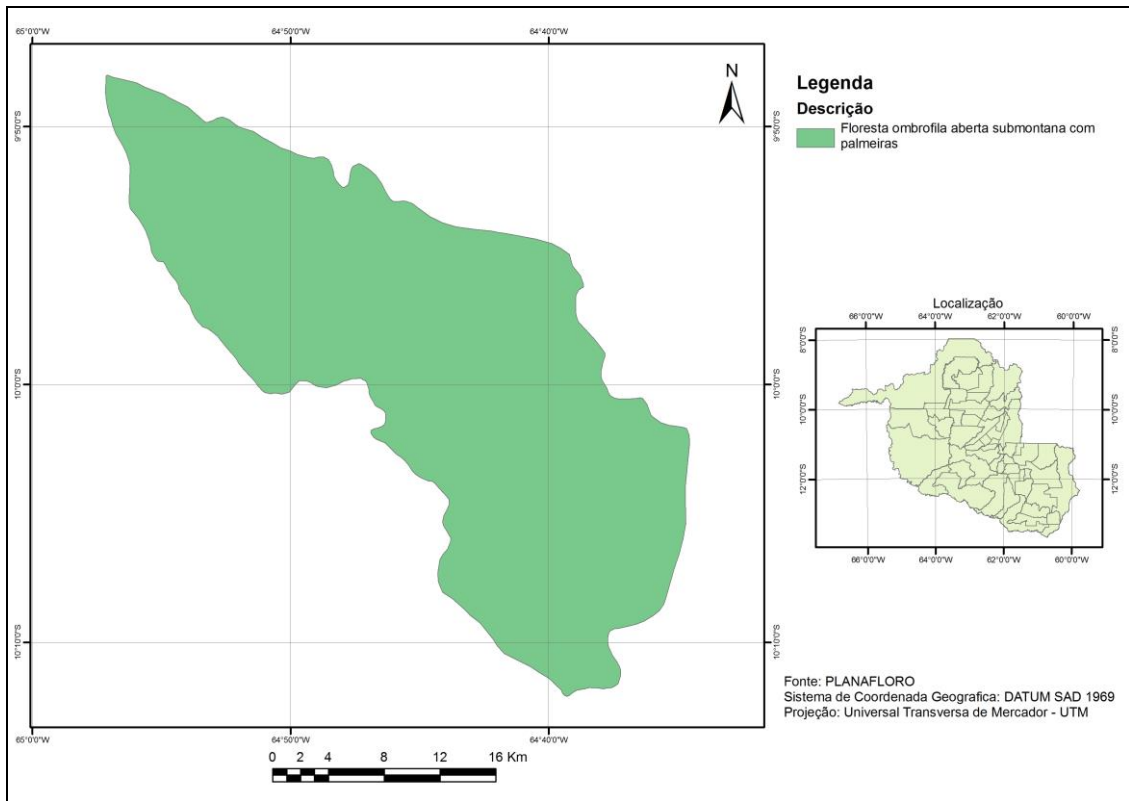


Figura 8 – Mapa de Vegetação da área de estudo.
 Organizado por Janielson da Silva Lima

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo abordaremos todos os procedimentos metodológicos referentes ao trabalho, para aplicação, análise e calibração de alguns parâmetros do modelo, bem como uso de material necessário para execução do trabalho.

4.1. Softwares utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes softwares: ArcGIS 8.3 Extensões: SpatialAnalyst v. 1.1 e 3D Analyst v. 1.0 desenvolvidos pela Environmental Systems Research Institute (ESRI), Redlands, California, EUA; *Interface ArcGIS - Soil and Water Assessment Tool* v. 2009 (ArcSWAT), desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station* e *USDA Agricultural Research Service*, o modelo SWAT **ele** é uma extensão do *Software ArcGIS*, sendo assim toda sua utilização é feita dentro do ambiente do *ArcGIS*; ENVI 4.3 (*Environment for Visualizing Images*); Excel 2010, desenvolvido pela *Microfotware Corporation*, foi utilizado para realização da classificação supervisionada com objetivo de mapear o uso e a cobertura da terra.

4.2 Estações De Monitoramento Hidrossedimentológica

As utilizadas neste trabalho duas estações instaladas e gerenciadas pelo Projeto FINEP CT-hidro 2010⁷, no qual contem sensor de sedimento, vazão e precipitação, localizadas no Rio Mutum Paraná, uma estação contendo sensor de Vazão e sedimento localizada no Rio Azul pertencente ao complexo hidrográfico da bacia do rio Mutum e uma estação climatológica gerenciada pela SEDAM instalada na Usina Hidrelétrica de Jirau. Os dados desta estação foram adquiridos no site <http://www.sedam.ro.gov.br/index.php/simego>, sendo equipada com sensores de precipitação, pressão atmosférica, umidade do ar, radiação solar, temperatura e vento. Os *data loggers* foram programados para coleta de dados a cada 30 minutos, a coleta de dados é contínua a cada 30 dias uma equipe de campo visita todas as estações de monitoramento para coleta, bem como averiguação das leituras das réguas e passagem

⁷ Projeto aprovado junto a FINEp, com título: Gestão de riscos hidrológicos na Amazônia.

do ADCP-M9. Na figura 09 podemos observar a localização dos pontos de monitoramento da área de estudo.

4.2.1 Dados de precipitação

Os dados do monitoramento hidrossedimentológico foram utilizados para a calibração e validação do modelo.

O período de dados adquirido foi do ano de 2012 a 2013, os dados de nível d'água e turbidez foram coletados diariamente por meio dos três sensores instalados nas estações.

4.2.2 Dados de vazão

Os dados de vazão observados são fundamentais na etapa de aplicação e calibração de um modelo hidrológico, possibilitando a adequação dos parâmetros calibráveis à realidade da bacia na qual o modelo está sendo aplicado. É um dado de suma importância quando tratamos da temática de modelagem hidrológica, então para a aquisição desse dado é necessário cuidado e certeza no momento da coleta, para que a calibração e validação do modelo seja confiável e capaz de representar o que foi observado em campo.

Os dados de vazão utilizados serão dados dos sensores das estações hidrossedimentológicas e do ADCP-M9 coletados periodicamente a cada 30 dias.

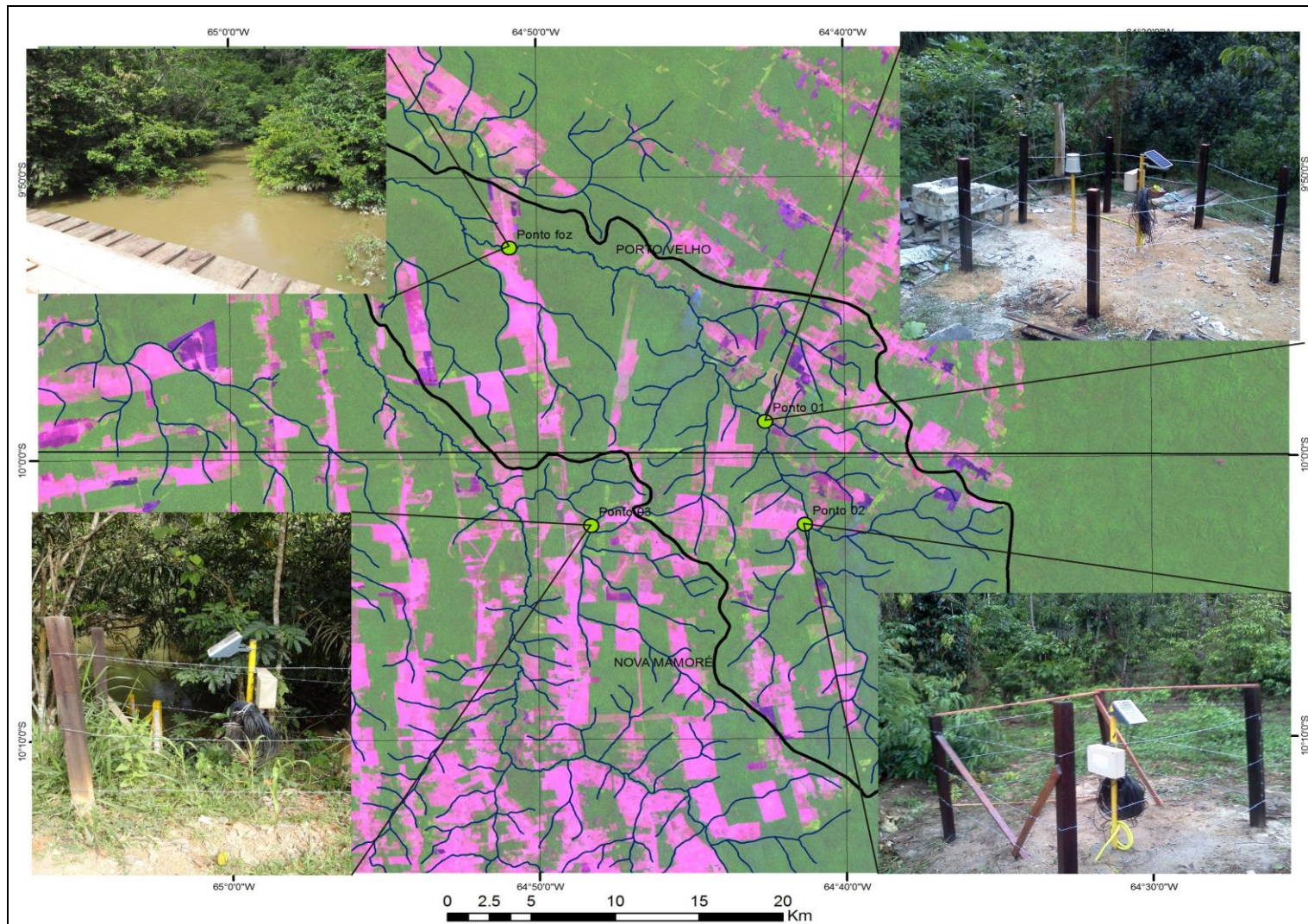


Figura 9 – Localização dos pontos de monitoramento na área de estudo.
 Organizado por: Janielson da S. Lima, 2012

4.3 ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler RiveSurveyor M9

As mensurações de vazão foram realizadas com equipamento ADCP-M9 em todos os rios que continham estação para que fosse possível a comparação entre os dados das estações e do equipamento portátil, bem como a averiguação de eventos fora do comum e possíveis anomalias. Abaixo podemos observar a figura 10 do equipamento M9.

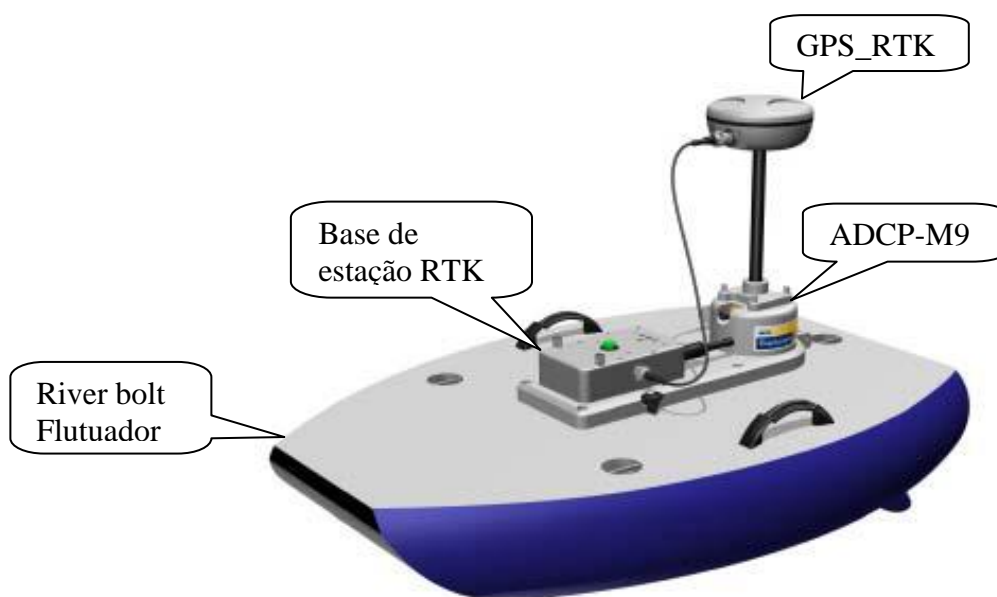


Figura 10 – Equipamento de medição de vazão ADCP – M9.
Fonte: Manual Sontek ADCP M9.

4.5 Base de Dados Espaciais

No levantamento e organização do banco de dados digital, foram utilizadas bases cartográficas do Sistema de Proteção da Amazônia - SIPAM contendo as temáticas de Vegetação, Geomorfologia, Pedologia do PLANAFLORO 2001, Bases Cartográfica de Geologia do Serviço Geológico do Brasil – CPRM 2007, cena de satélite *Landsat-5/TM* do ano de 2012 obtidas no site do INPE e cenas *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Goblal Didital Elevation Model (GDEM)* no site da NASA para gerar os dados Topográficos da área de estudo.

- ✓ Base de Geolgia – Serviço Geológico do Brasil – CPRM.
- ✓ Base de Geomorfología – Governo do Estado de Rondônia – PLANAFLORO

- ✓ Base de Pedológica – Governo do Estado de Rondônia – PLANAFLORO
- ✓ Cena da Imagem *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)* - (GDEM).
- ✓ Cena Imagens de Satélite *Landsat-5 TM*, bandas 3, 4 e 5, órbita/ponto 233/66 – INPE – 2011.
- ✓ Dados Vetoriais de Limites Municipais e Estaduais – IBGE.

4.6 PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO SWAT

Para melhor entendimento do modelo, vamos expor todas as fórmulas que são utilizadas pelo modelo e que definem todo o processo de funcionamento do SWAT.

De acordo com Malluta (2012), as simulações hidrológicas na bacia hidrográfica realizadas pelo modelo SWAT podem ser separadas em duas partes: fase terrestre e fase de propagação do ciclo hidrológico.

4.6.1 A Fase inicial do ciclo hidrológico (Fase terrestre)

A fase terrestre do ciclo hidrológico é ainda dividida em sete componentes⁸, podendo ou não serem simulados, e variam de acordo com a necessidade do usuário do modelo. Para atender os nossos objetivos, neste trabalho optamos em utilizar apenas quatro componentes: Hidrologia, Clima, Sedimento e Manejo agrícola. Na figura 11 podemos observar todo o Ciclo hidrológico simulado pelo Modelo SWAT e seus componentes.

⁸ Os sete componentes são Hidrologia, Clima, Sedimento, Manejo Agrícola, Nutrientes e Pesticidas.

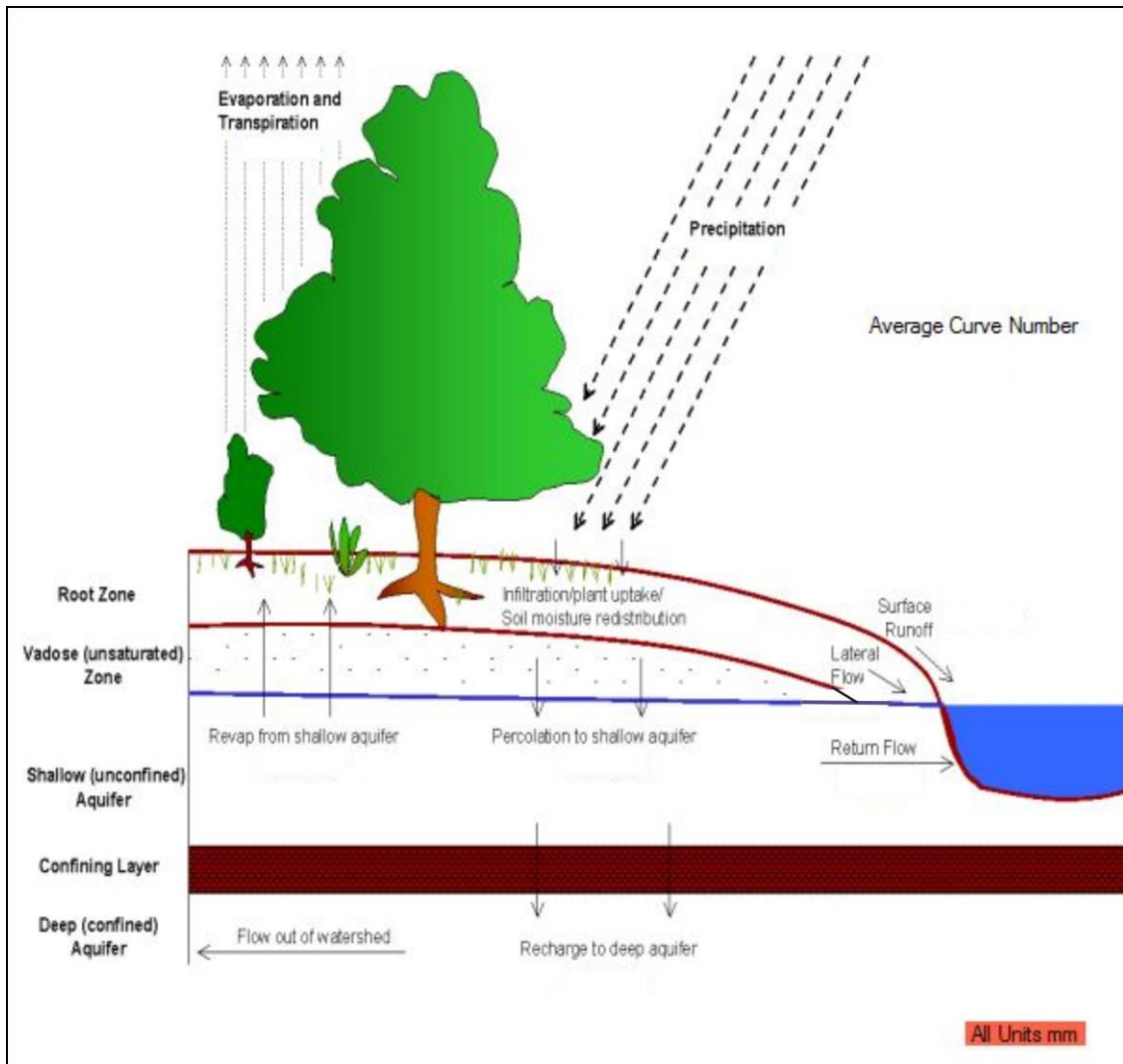


Figura 11 – Ciclo hidrológico simulado pelo Modelo SWAT.

Fonte: SWAT 2009.

Organizado por Janielson da Silva Lima

O ciclo hidrológico utilizado nas simulações do SWAT é baseado na equação do balanço hídrico:

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

SW_t = conteúdo final de água no solo (mm);

SW = conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm);

t = tempo (dias);

R_i = precipitação (mm);

Q_i = escoamento superficial (mm);

ET_i = evapotranspiração (mm);

P_i = percolação (mm);

QR_i = fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

As subdivisões da bacia hidrográfica em Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU) permitem que o modelo calcule diferentes evapotranspirações para cada tipo de uso e cobertura vegetal e solo. As 27 HRU são caracterizadas por conterem o mesmo uso e cobertura vegetal, tipo de solo e declividade, assim, o escoamento superficial estimado separadamente para cada HRU é mais preciso e melhora a descrição do balanço hídrico da bacia.

4.6.2 Escoamento Superficial

O escoamento Superficial no modelo SWAT é calculado pelos valores de precipitação diária e pelo método da Curva Número (CN). O método CN é um produto empírico de mais de vinte anos de estudo em pequenas bacias hidrográficas nos Estados Unidos. O método CN foi desenvolvido para determinar o escoamento superficial em diferentes usos, coberturas vegetais e tipo de solo.

Segundo Neitsch *et al.* (2002), o modelo utiliza uma formulação modificada do Método da Curva Número (CN), do Soil Conservation Service - SCS (Estados Unidos, 1972), para calcular o escoamento superficial da classe, uso e manejo do solo:

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

Onde Q_{surf} é o escoamento superficial total (mm); P_i é a precipitação total (mm); I_a é a abstração inicial (o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial em mm) e S é o parâmetro de retenção (mm) o qual varia com o uso.

$$S = 25,4 \cdot \frac{100}{CN} - 10 \quad (3)$$

O método CN (NRCS, 2007) define três condições de umidade antecedente: (i) CN_1 - condição seca (ponto de murcha); (ii) CN_2 - condição de umidade média, e (iii) CN_3 - condição úmida (capacidade de campo). Os valores tabelados de CN encontram-se na condição CN_2 , são utilizadas para transformar em CN_1 e CN_3 , respectivamente.

$$CN_1 = \frac{CN_2 - 20 \cdot (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \text{epx}(2,3533 - 0,0636 \cdot 100 - CN_2)} \quad (4)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot [0,00673 \cdot (100 - CN_2)]$$

A condição inicial para que o escoamento superficial ocorra é que P seja maior que Ia . Conforme NRCS (2007), a abstração inicial (Ia) é adotada como sendo $0,2S$, portanto a equação do escoamento superficial pode ser apresentada como:

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - 0,2S)^2}{(P_i + 0,8S)} \quad P > 0,2S \quad (5)$$

$$Q_{surf} = 0 \quad P < 0,2S \quad (6)$$

4.6.3 Vazão de Pico

O modelo utiliza o Método Racional Modificado para calcular a vazão de pico Neitsch *et al.*, (2002).

$$Q_{pico} = \frac{CN.i.A}{3,6} \quad (7)$$

Onde Q_{pico} é a vazão de pico (m³/s); i^* é a intensidade da precipitação (mm/h); e A é a área da bacia (km²). e 3,6 é um fator de conversão de unidades.

4.6.4 Tempo de concentração

O tempo de concentração é o tempo decorrido para que a água que precipita no local mais distante da bacia escoe até o exutório:

$$t_{conc} = t_{cs} + t_{cc} \quad (8)$$

Onde t_{conc} é o tempo de concentração na bacia (horas); t_{cs} é o tempo de concentração do escoamento terrestre (horas); e t_{cc} é o tempo de concentração do escoamento no canal (horas).

4.6.5 Escoamento lateral

O escoamento lateral é significativo em solos com uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável.

O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento subsuperficial desenvolvido por Sloan *et al.* (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Este modelo de armazenamento cinemático é baseado na equação do balanço de massa (balanço de massa líquida) onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle:

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly, excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (9)$$

Onde Q_{lat} é a quantidade de água que escoo subsuperficialmente (mm); $SW_{ly, excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm.h-1); slp é a declividade média da sub-bacia (m.m-1); ϕ_d é a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm-1); e L_{hill} é o comprimento do declive (m).

4.6.6 Escoamento Subterrâneo

O escoamento de base ou subterrâneo somente entra no canal se a quantidade de água armazenada no aquífero exceder um valor limiar especificado pelo usuário. A resposta do estado estacionário do escoamento subterrâneo até a recarga é descrito como:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{(L_{gw})^2} \cdot h_{wtbl} \quad (10)$$

Onde Q_{gw} é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm.dia-1); L_{gw} é a distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m); e h_{wtbl} é o altura do lençol freático (m).

4.6.7 Percolação

A percolação é calculada para camada do perfil do solo:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly, excesso} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (11)$$

Onde $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para a próxima camada (mm); $SW_{ly, excesso}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm); Δt é a duração do passo de tempo (horas); e TT_{perc} é o tempo de propagação na camada do solo (horas). A água percola somente quando o teor de água exceder a capacidade de campo para aquela camada.

O volume de água disponível para a percolação nas camadas do solo é calculado como:

$$SW_{ly, excesso} = SW_{ly} - FC_{ly}, se SW_{ly} > FC_{ly} \quad (12)$$

$$SW_{ly,excesso} = 0 \quad se\ SW_{ly} > FC_{ly} \quad (13)$$

Onde SW_{ly} é o conteúdo de água na camada do solo (mm); e FC_{ly} é o conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

O tempo de percolação é único para cada camada do solo e é calculado:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{k_{sat}} \quad (14)$$

Onde TT : é o tempo de percolação (h); SAT_{ly} é a quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado (mm); e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada na camada (mm.h⁻¹).

4.6.8 Evapotranspiração

A evapotranspiração compreende todos os processos de transformação da água da superfície da terra para vapor (evaporação, transpiração e sublimação). A evapotranspiração é um dos principais meios de saída de água da bacia, aproximadamente 62% da precipitação é evapotranspirada.

A evapotranspiração potencial foi um conceito inserido por Thornthwaite (1948) na classificação climática sendo o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração de uma superfície extensa e coberta de vegetação e bem suprida de água.

Existem vários métodos de determinação da evapotranspiração, o SWAT disponibiliza três métodos de calcular a evapotranspiração: Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989), to Priestley-Taylor method (Priestley e Taylor, 1972) e o Hargreaves method (Hargreaves et al., 1985).

No presente trabalho o método utilizado para cálculo da evapotranspiração foi o de Penman-Monteith (Equação 22). Este método requer a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + p_{ar} \cdot c_p [e_z^o - e_z]}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (15)$$

Onde: λE E é o fluxo de densidade do calor latente (MJ.m-2.d-1); E é a altura da taxa de evaporação (mm.d-1); Δ é a declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura; H_{net} é a radiação líquida (MJ.m-2.d-1); G é a densidade de fluxo de calor do solo (MJ.m-2.d-1); ρ_{ar} é a densidade do ar (kg.m-3); C_p é o calor específico à pressão constante (MJ.kg-1.°C-1); e_z é a pressão de saturação do vapor no ar na altitude z (kPa); e é a pressão de vapor da água no ar na altitude z (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa.°C-1); r_c é a resistência de interceptação vegetal (s.m-1); e r_a é a resistência aerodinâmica (s.m-1).

4.6.9 Aporte de Sedimentos

O modelo SWAT estima o aporte de sedimentos através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (Williams, 1975), a qual se baseia na Equação Universal de Perda de Solo – USLE (Wischmeier & Smith, 1965). A diferença entre as equações consiste na substituição do fator energia cinética da chuva (R) da USLE por um fator de escoamento (Williams, 1975), gerado com base no volume escoado e na vazão de pico. Essa alteração permite prever o aporte de sedimentos em pequenas e médias bacias hidrográficas por meio de análises de eventos individuais. Assim, o SWAT utiliza a MUSLE para calcular o aporte de sedimentos em cada HRU (Unidade de Resposta Hidrológica).

$$Sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (16)$$

Onde: sed: aporte de sedimentos diária (ton); Q_{surf} : volume de escoamento superficial (mm H₂O ha-1); q_{peak} : vazão de pico (m³ s-1); $area_{hru}$: área da unidade de resposta hidrológica (HRU) (ha); K_{USLE} : fator erodibilidade (0,013 ton m² hr (m³ - ton cm)-1); C_{USLE} : fator de uso e manejo do solo (adimensional); P_{USLE} : fator de práticas conservacionistas (adimensional); LS_{USLE} : fator topográfico (adimensional); $CFRG$: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

4.6.10 Fator de Erodibilidade do Solo

O fator K de Erodibilidade do solo representa a suscetibilidade do solo em ser erodido, e é dado pelas características intrínsecas do mesmo. Wischmeier *et al.* (1971) desenvolveram a seguinte expressão para calcular o fator erodibilidade do solo:

$$K_{usle} = \frac{0,00021 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2,25 \cdot (C_{perm} - 3)}{100} \quad (17)$$

KUSLE: fator erodibilidade (0,013 ton m² hr (m³- ton cm)-1); M: parâmetro de tamanho de partícula (adimensional); OM: porcentagem de matéria orgânica (%); Csoilstr: código usado para classificar a estrutura do solo (Csoilstr=1 para estrutura granular muito fina; Csoilstr=2 para estrutura granular fina; Csoilstr=3 para estrutura granular média ou grossa; Csoilstr=4 para estrutura em blocos, laminar ou massiva); Cperm : código para classe de permeabilidade do solo (Cperm= 1 para permeabilidade rápida; Cperm= 2 para permeabilidade moderada a rápida; Cperm = 3 para permeabilidade moderada; Cperm = 4 para permeabilidade lenta a moderada; Cperm = 5 para permeabilidade lenta; Cperm = 6 para permeabilidade muito lenta);

O parâmetro de tamanho de partícula é calculado por:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs})(100 - m_c) \quad (18)$$

Onde:

M: parâmetro de tamanho de partícula (adimensional); msilt: porcentagem de silte (0,002 – 0,05 mm de diâmetro); mvfs: porcentagem de areia fina (0,05 – 0,10 mm de diâmetro); mc: porcentagem de argila (<0,002 mm de diâmetro).

A porcentagem de matéria orgânica pode ser calculada:

$$OM = 1,72 \cdot Corg \quad (19)$$

Onde Corg é a porcentagem de carbono orgânico presente na camada de solo analisada.

4.6.11 Fator de Uso

O fator de uso e manejo do solo expressa a relação esperada entre as perdas de solo em áreas com culturas agrícolas e vegetação, com áreas continuamente descobertas. Para solos sem vegetação e sem proteção tem-se referencial igual a 1.

Considerando que a eficiência de proteção das plantas ao solo está diretamente relacionada com seu ciclo de desenvolvimento e a geração de resíduos, o SWAT calcula o fator de uso e manejo do solo diário através da seguinte equação:

$$C_{usle} = \exp\left[\ln(0,8) - \ln(C_{usle,mm})\right] * \exp\left[-0,00115 * rsd_{surf}\right] + \ln[C_{USLE}] \quad (20)$$

Onde: $C_{usle,mm}$ é um valor mínimo do fator de uso e manejo do solo e rsd_{surf} é a quantidade de resíduos sobre a superfície de solo (kg ha-1). O valor mínimo do fator de

uso e manejo do solo pode ser estimado a partir da seguinte expressão (Arnold & Williams, 1995):

$$C_{usle} = 1,463 \ln[C_{USLE}] + 0,1034 \quad (21)$$

Sendo C_{usle} a média anual do fator C da cobertura vegetal considerada.

4.6.12 Fator de Práticas Conservacionistas

O fator de práticas conservacionistas representa a relação entre a perda de solo esperada, com determinada prática conservacionista, e a obtida quando a cultura é plantada no sentido do declive (morro abaixo). Práticas comuns é o plantio em contorno, terraceamento e alternância de culturas.

A Tabela 2 a seguir apresenta os valores adotados de P_{usle} e os limites de comprimento de rampa para locais onde se adota práticas conservacionistas com plantio em contorno.

O fator de práticas conservacionistas P_{usle} é definido como a taxa de perda do solo com uma específica prática, os valores de P são classificados de acordo com a declividade e comprimento, a seguir a tabela 2 com os valores para o fator conservação.

Declividade%	P_{usle}	Comprimento Max (m)
1 – 2	0,60	122
3 – 5	0,50	91
6 – 8	0,50	61
9 – 12	0,60	37
13 – 16	0,70	24
17 – 20	0,80	18
21 – 25	0,90	15

Fonte: Neitsch et al., 2002

Tabela 2 – Valores de fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno.

Organizado por Janielson da Silva Lima

4.6.13 Fator Topográfico

Os fatores L e S são apresentados em conjunto e denominados “Fator Topográfico”. O comprimento do declive (L) representa a relação de perdas entre um declive de comprimento qualquer e um declive de 22,1 m de comprimento do mesmo solo, mesmas características de chuva, mesmo grau de inclinação e sob mesmas

condições de manejo. Grau do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, para as mesmas condições.

O fator topográfico é calculado:

$$LS_{usle} = \left(\frac{L_{hill}}{22,1} \right)^m * (65,41 * sen^2 + (a_{hill}) + 4,56 * sen a_{hill} + 0,065) \quad (22)$$

Onde: L_{hill} : comprimento de rampa (m); m : termo exponencial; α_{hill} : ângulo do declive.

O termo exponencial, m , é obtido utilizando a seguinte equação:

$$m = 0,6(1 - \exp[-35,835 * slp]) \quad (23)$$

Onde slp é a declividade da unidade de resposta hidrológica (HRU) expressa em m m⁻¹.

A relação entre α_{hill} e slp é:

$$slp = \tan \alpha_{hill} \quad (24)$$

Analisando o equacionamento utilizado pelo modelo SWAT para o cálculo do fator L_{usle} , constata-se que o comprimento de rampa (L_{hill}) é a distância máxima entre os extremos da HRU e a declividade (slp) é simplesmente a relação entre esse comprimento de rampa e a diferença de altimetria nos extremos da HRU. Dessa maneira, já se podem prever falhas na estimativa do aporte de sedimentos, pois essa é uma forma muito simplificada de cálculo desse fator, o qual poderá conduzir a superestimacões devido a não consideração dos tipos de terreno (côncavo e convexo).

4.6.14 Propagação do ciclo hidrológico

A propagação no canal principal consiste nos componentes: propagação da vazão líquida, propagação da vazão sólida e propagação química. Para atender nossos objetivos, nesta dissertação somente foram abordados a propagação da vazão líquida e sólida.

A propagação da água pelo curso d'água é realizada pelo método do armazenamento variável que foi desenvolvido por Williams (1969). Os dados requeridos pelo modelo incluem comprimento, declividade, profundidade, declividade lateral e o parâmetro de rugosidade do curso d'água.

O transporte de sedimentos nos cursos d'água é função dos processos de exposição e degradação. A deposição no curso d'água através das sub-bacias é baseada na velocidade de queda das partículas de sedimentos e a degradação é determinada pela força do escoamento.

4.7 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUTUTM PARANÁ

O modelo utilizado necessita de uma grande quantidade de parâmetros de entrada que estão intimamente ligados com as características físicas da bacia. Para o desenvolvimento deste trabalho os parâmetros requeridos pelo modelo SWAT estão divididos em parâmetros climáticos, de solo e hidrológicos. Antes de iniciar a aplicação é necessário alimentar o banco do próprio modelo com informações locais, tornando o modelo versátil, pois o mesmo utiliza-se das características locais para modelar os processos. Então, para isso fizemos a inserção dos dados tabulares, de solo, clima e uso da terra, para então iniciarmos o processo de aplicação do modelo.

4.7.1 Modelo Numérico do Terreno

O processo de modelagem de bacias hidrográficas comumente começa com a geração de um modelo numérico de terreno, definida por feições altimétricas contendo dados de X, Y e Z.

Para a elaboração do Modelo Digital de Elevação, foram utilizadas cenas do *RADAR Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM)* referentes à área de estudo (BHM-P) no *software ARCGIS 8.3*, após a entrada deste dado utilizamos a *extension Contour*, para gerar as curvas de nível; em seguida criamos um *shape file* na forma quadrática um pouco maior que a área de estudo para que não ocorresse o efeito de borda dentro da área de estudo; logo após fizemos o recorte das curvas geradas utilizando a *extension Clip* e por fim geramos o MDE com a *Extension 3D analyst*. Após a obtenção desse procedimento, foi feito o pré-processamento dos dados digitais de elevação e drenagem.

Segundo Lima (2012), a grande maioria dos *softwares* que geram o Modelo Digital de Elevação necessita que os dados digitais de entrada estejam com qualidade e estrutura aceitáveis. Para isso, foram gerados arquivos individuais contendo os limites da área de estudo, a hidrografia digital conectada e orientada no sentido do escoamento superficial e dados de altimetria discriminados em curvas de nível e pontos cotados.

De acordo com Chaplot (2004), a dimensão da malha do MNT deve ser escolhida com base na precisão do mapa de uso de solo disponível e vice-versa, tendo constatado em seus estudos que, em malhas superiores a 50m, a produção de sedimentos foi subestimada, o que pode ser explicado pela não-linearidade dos processos erosivos. Dessa forma, pode-se ressaltar que, quanto mais discretizado for o MNT, mais consistentes serão os resultados, uma vez que a rotina de cálculo da produção de sedimentos é baseada na Equação Universal de Perda de Solo Modificada - MUSLE (Williams, 1975), onde parâmetros topográficos, como a declividade e o comprimento de rampa, são determinantes para estimar de forma adequada a produção de sedimentos.

Um aspecto importante na modelagem espacial distribuída é definir adequadamente o delineamento de sub-bacias e a extração da rede de drenagem a partir dos MNT's. A representação do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica e do seu grau de ramificação permite caracterizar a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, a propagação dos sedimentos que escoam ao longo desta (Calijuri et al., 1998).

4.7.2 Subdivisão da Bacia Hidrográfica e as Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU).

No processo de funcionamento do modelo, uma das etapas é a subdivisão da bacia em sub-bacias. Para isso, o modelo adiciona automaticamente os pontos confluência de linha d'água que as delimitam a partir do MNT e da malha hidrográfica, calculando o número das mesmas, sendo possível alterar manualmente o número de sub-bacias conforme a necessidade do estudo. Para uma melhor resposta do modelo é interessante que as sub-bacias estejam com a mesma proporção de tamanho, por conta disso alteramos manualmente a grandeza das sub-bacias.

As unidades de resposta hidrológica (HRU's) dentro da linha divisória das águas são determinadas baseando-se no uso da terra e nos dados de camadas de solo. O item de distribuição de HRU's permite especificar critérios utilizados para determinar a distribuição do HRU's. Com maior sensibilidade para um dos dois critérios, ou o uso e ocupação do solo ou tipos de solos, em combinações de unidades de resposta hidrológicas que pode ser criado para cada sub-bacia ou para toda a bacia.

4.7.3 Dados de Uso da Terra

Os dados de uso foram utilizados de Nunes (2012), onde foram realizadas aplicações de formulários para definição das classes de uso da terra e registro de ponto de coordenadas por meio de GPS, o procedimento para a definição das classes. Para isso adotou-se o método de Brasil (2006), que definiu o levantamento dos usos como “o conjunto de operações necessárias à elaboração de uma pesquisa temática que pode ser sintetizada através de mapas”. Neste trabalho, o Uso e Ocupação da Terra será entendido como “a distribuição geográfica da tipologia de uso, identificada através de padrões homogêneos da cobertura terrestre” (BRASIL, 2006).

O mapa de Uso e Ocupação da Terra foi obtido com Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, a partir de base georreferenciada de *GEOCOVER* 2000 e Imagens *Landsat-05* Bandas 5R,4G,3B. As imagens foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE por meio de solicitação eletrônica e georreferenciadas utilizando a Ferramenta *Georeferencing* disponível na plataforma *ARCGIS* 8.3. Os pontos amostrais para o georreferenciamento foram determinados através de identificação de pontos homólogos identificados em imagens e vetores já georreferenciados.

Realizada a confirmação e/ou checagem dos pontos anteriormente definidos, seguiu-se para a classificação supervisionada através do software *ARCGIS* 8.3 e sua ferramenta de extensão de Análise Espacial. A Classificação Supervisionada foi realizada utilizando Imagem de satélite do ano base 2011 (nesta etapa foi realizada uma pequena atualização da base de dados de Nunes (2012), para essa atualização foi utilizada a imagem *Landsat TM* do ano de 2013) com todos os pontos checados em campo e suas respectivas classes de acordo com cada uso. Desse modo, o processo seguiu utilizando a ferramenta (*Spatial Analyst Tools > Multivariate > Maximum Likelihood Classification*), o que definiu as classes geradas. Logo depois foram estabelecidos filtros para correção de dispersão de *pixels* e suavizações para obtenção de melhores resultados.

4.7.4 Dados Pedológicos

O banco de dados de solo requer informações das características físicas e hídricas de cada classe de solo, o mapa de solos da SBHMP utilizado foi o recorte com base no levantamento de solos (escala 1:250.000) realizado em 2001 pelo plano Agropecuário Florestal de Rondônia, bem como todos os dados tabulares requeridos

pelo modelo. Os dados tabulares de solos necessários para o funcionamento do modelo SWAT são: grupos de saturação (HYDGRP), 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.

4.7.5 Grupos hidrológicos de solos

O grupo hidrológico dos solos foi classificado com base na classificação do U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS Soil Survey Staff, 1986). Os solos diferem-se em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D), em função dos valores de condutividade hidráulica (mm h⁻¹) de cada classe de solo nos seus horizontes, onde podemos observar na tabela abaixo os quatros grupos:

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

Tabela 3 – Grupos Hidrológicos de solos

Fonte: USDA-NRCS (2007).

Organizado por Janielson da Silva Lima

Depois de termos organizado todos os dados necessários, fizemos a inserção no banco do modelo, assim como podemos observar na figura 15.

4.7.6 Curva Número

O método da Curva Número (CN) foi idealizado e desenvolvido pelo Serviço de Conservação dos Solos (*Soil Conservation Service - SCS*), do Departamento de

Agricultura dos Estados Unidos (United States Department of Agriculture – USDA), resultando em um parâmetro que é utilizado para o cálculo do escoamento superficial que se baseia nas características de permeabilidade do solo, seu uso e condições de umidade antecedente.

Com o objetivo de padronizar as curva, o SCS obteve curvas que correlacionam a precipitação com o escoamento de várias sub-bacias dos E.U.A. **Figura 12**, onde números adimensionais foram estabelecidos, as chamadas Curvas Número, ou CN's. As tabelas com os valores de CN com relação ao uso e ocupação do solo e o grupo hidrológico utilizadas pelo modelo podem ser encontradas no manual do SWAT (Neitsch *et al.*, 2002).

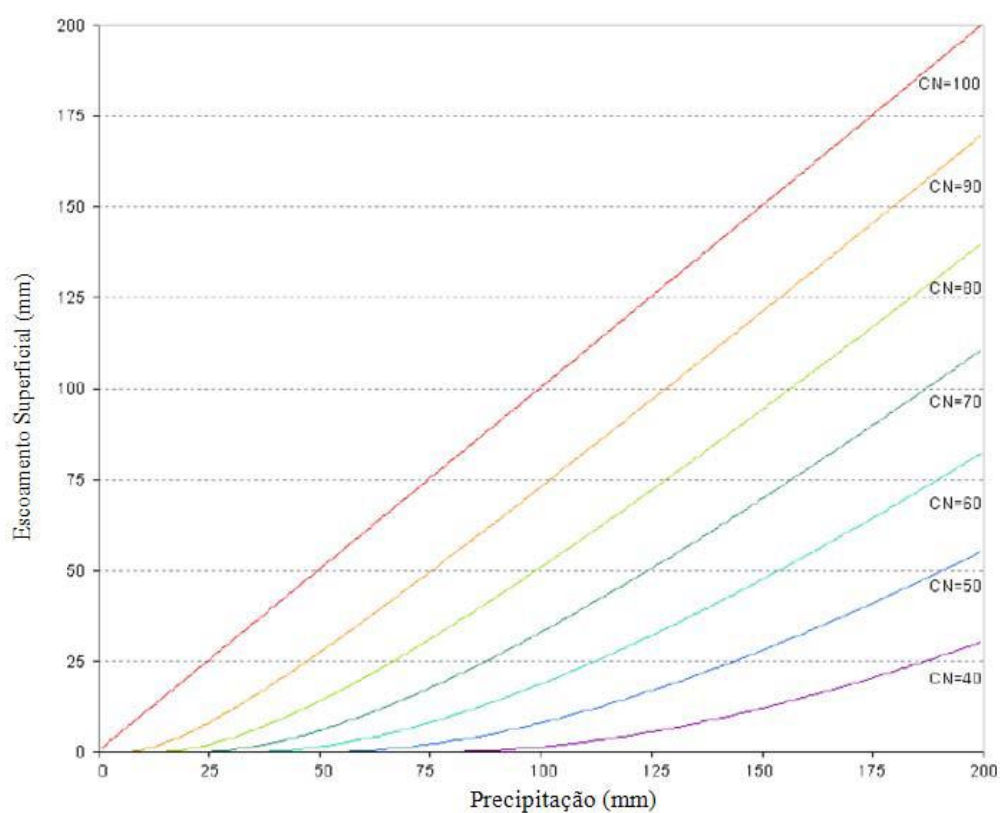


Figura 12 - Relação entre a vazão e a precipitação no método SCS de Curva de Número
Fonte: Neitsch et al., 2002.

A variação do valor de CN pode ser de 0 a 100, correspondendo a zero para uma bacia de condutividade hidráulica infinita, e a cem a uma bacia totalmente impermeável.

4.7.7 Características Granulométricas e Textuais do Solo

Para a caracterização granulométrica do solo da SBHMP, definição das porcentagens de argila, silte, areia e seixo, utilizou-se a classificação recomendada pelo Soil - USDA (1999) e apresentada na Tabela 5.

Classificação Granulométrica	Diâmetro
Cascalho	>2mm
Areia	2 a 0,05mm
Silte	0,05 a 0,002mm
Argila	0,002mm

Tabela 4 – Classificação Granulométrica
Fonte – Soil USDA, 1999
Organizado por Janielson da Silva Lima

O valor de porosidade (ANION_EXCL) é definido pela relação entre o volume ocupado pelos poros e o volume total do solo. Dalbianco (2009), para determinar a porosidade das amostras de solo, baseou-se no princípio de que o valor do volume poroso corresponde ao volume de água contido nessa amostra saturada.

4.7.8 Disponibilidade de Água no Solo e Condutividade Hidráulica

O cálculo de água disponível no solo considera a faixa de umidade compreendida entre o limite superior de disponibilidade de água às plantas, chamada de capacidade de campo (FC), e o limite inferior de disponibilidade, conhecido como ponto de murcha permanente (WP) (Hillel, 1980).

Para permitir que estes dois limites sejam obtidos mais facilmente, foi redefinido nos termos das tensões em que a água é mantida pelo solo.

A capacidade do campo (FC) 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, considera-se que é a quantidade de água retida no solo em uma tensão de 1,5 MPa. Contudo, a disponibilidade de água no solo foi obtida a partir das informações disponíveis no site banco mundial de solos disponível no link <http://www.isric.org/>.

A condutividade hidráulica do solo é um parâmetro que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo e sua determinação torna-se imprescindível, visto que o movimento da água no solo está diretamente relacionado à produção das culturas agrícolas.

Para a SBHMP, a condutividade hidráulica do solo foi determinada com auxílio da ferramenta *ROSETTA LITE - HYDRUS 1D*, que utiliza dados granulométricos de cada camada do solo para estimar a condutividade hidráulica.

4.7.9 Erodibilidade do solo

Podemos entender a erodibilidade como sendo um atributo do solo que representa a sua susceptibilidade em ser desagregado e transportado pela ação de um agente erosivo.

Para a SBHMP determinamos a erodibilidade da bacia com base na equação de Wichmeir *et al* (1971), descritos no item 4.6.10.

4.7.10 Parâmetros de Albedo e Conteúdo Orgânico

O albedo (SOL_ALB) corresponde à parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando-se principalmente a influência da cobertura vegetal. Dessa forma, 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, sem cobertura vegetal, e a fase de crescimento e maturação. Para este trabalho, o albedo foi utilizado o valor obtido por Oliveira *et al* (2013).

O carbono orgânico está diretamente relacionado com o uso e manejo do solo para a área de estudo em questão utilizou os valores de (SOL_CBN), disponíveis no site do banco mundial de solo <http://www.isric.org/>.

Após todos os parâmetros organizados, digita-se direto no banco de dados do modelo SWAT cada classe de solo e para cada horizonte, como mostra a Figura 13.

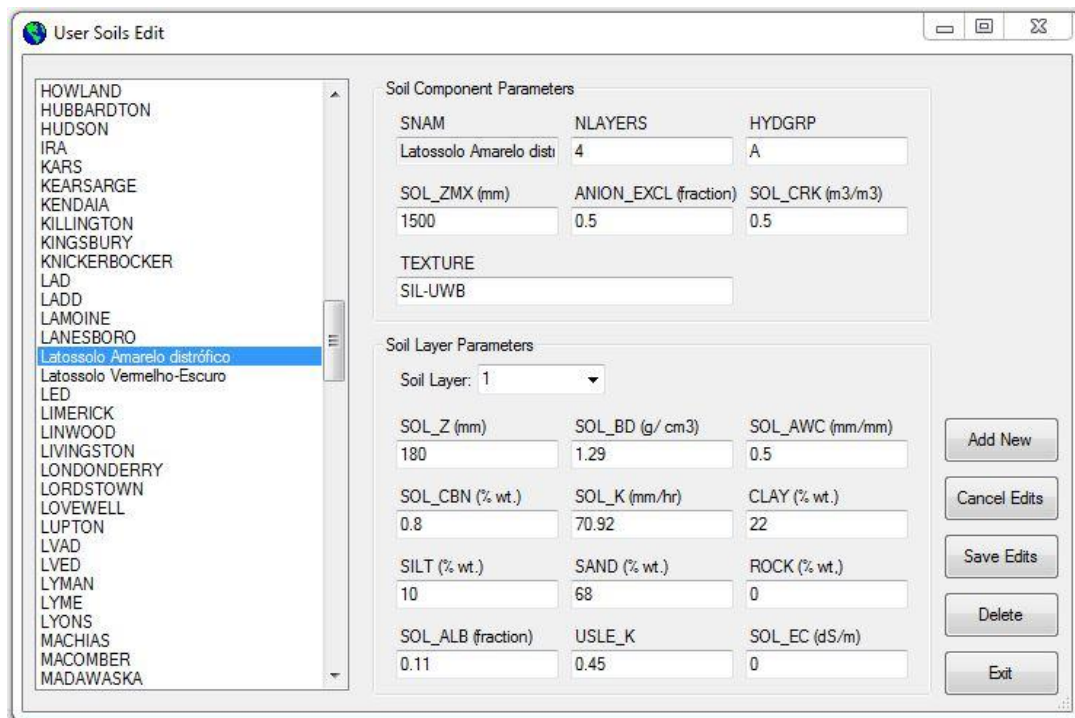


Figura 13 – Imagem de edição do banco de solos da SBHMP no modelo SWAT.

Fonte SWAT 2009.

Organizado por Janielson da Silva Lima

Os valores referentes aos parâmetros físicos para a temática solo, requeridos pelo modelo SWAT, estão contidos na Tabela 05.

Dados	LAD	LEVD	LAD	LEVD	LAD	LEVD	LAD	LEVD
NLAYERS	1	1	2	2	3	3	4	4
HYDGRP	A	A	A	A	A	A	A	A
SOL_ZMX	>2200mm	>2200mm	>2200mm	>2200mm	>2200mm	>2200mm	>2200mm	>2200mm
SOL_Z	150mm	100mm	550mm	400mm	900mm	800mm	>2200mm	>2200mm
SOLZ_BD	1.25g cm ³	1.49g cm ³	2.5g cm ³	1.49g cm ³	1.25g cm ³	1.49g cm ³	1.25g cm ³	1.49g cm ³
SOL_AWC	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm	0.5mm/mm
SOL_CBN	0.55%	0.8%	0.3%	0.45%	0.55%	0.45%	0.3%	0.45%
SOL_K	22.83mm/hr	14.03mm/kr	21.34mm/hr	17.35mm/hr	19.96mm/hr	19.85mm/hr	17.0mm/hr	20.64mm/hr
CLAY	63%	44%	65%	40%	67%	37%	82%	36%
SILT	10%	7%	10%	7%	12%	7%	7%	7%
SAND	28%	49%	25%	53%	21%	56%	11%	57%
ROCK	0%	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SOL_ALB	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
USLE_K	0.15	0.23	0.14	0.28	0.13	0.31	0.08	0.32

LAD: Latossolo Vermelho Distrófico; LEVD: Latossolo Escuro Vermelho Distrófico; NLAYERS é o número da camada de informação (números de horizontes); HYDGRP é o grupo de mínima saturação hidráulica (A, B, C e D); SOL_ZMX é a profundidade máxima de solo que a raiz alcança (mm); ANION_EXCL é a fração de porosidade do solo (fração); SOL_Z é a profundidade de cada horizonte (mm); SOL_BD é a densidade do solo (g cm⁻¹); SOL_AWC é a capacidade de água do solo (mm mm⁻¹); SOL_K é a condutividade hidráulica saturada (mm h⁻¹); SOL_CBN é o conteúdo de carbono orgânico do solo (% peso solo); CLAY é a porcentagem de argila no solo (% peso solo); SILT é a porcentagem de silte no solo (% peso solo); SAND é a porcentagem de areia no solo (% peso solo); ROCK é a porcentagem de cascalho no solo (% volume); SOL_ALB é o albedo do solo (fração); e USLE_K é o fator de erodibilidade do solo (0,013 ton m² hr (m³ - ton cm⁻¹)).

Tabela 5 – Características físicas das classes de solo da bacia do rio Mutum Paraná Parâmetros Climáticos.

Fonte SWAT 2009.

Organizado por Janielson da Silva Lima

Os dados de precipitação e sedimento necessários para entrada no SWAT foram utilizados da estação hidrossedimentológica projeto Finep, os dados meteorológicos requeridos foram utilizados da estação meteorológica da SEDAM, localizada a 70 km da área de estudo, disponível no site <http://www.sedam.ro.gov.br/index.php/simego>.

Cada variável deve ter a mesma série temporal, visto que o modelo correlaciona as variáveis através das tabelas com as coordenadas de localização, e gera uma única tabela pra cada parâmetro climático utilizado. Abaixo podemos observar os parâmetros necessários para utilizar o gerador climático.

4.7.11 Parâmetros para o Gerador Climático

Para execução dos parâmetros climáticos o SWAT utiliza o modelo gerador climático WXGEN de Sharpley & Williams (1990 p.145)

O arquivo a ser inserido no gerador climático deve conter dados médios necessários para gerar dados climáticos diários que são gerados pelo modelo em duas situações: quando é especificado que os dados irão ser produzidos, ou quando algum dado está faltando. Assim, as variáveis climáticas são parametrizadas mensalmente (média e desvio padrão) para então serem introduzidas no modelo. A seguir, na tabela 07, podemos observar todos os parâmetros necessários a serem inseridos no gerador climático do modelo SWAT. A figura 14 apresenta a Janela de entrada dos parâmetros climáticos no modelo SWAT.

Sample	Station Name	WLONGITUDE (deg)	WLATITUDE (deg)	RAIN_YRS (yrs)	WELEV (m)
Romildo	Romildo	-88.69	-31.65	2	179.8

Parameter: TMPMX	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	30.3	29.9	31.1	31.8	31.6	31.5	32.6	34.4	34.7	33.4	31.8	30.8

Figura 14 – Janela de entrada dos parâmetros climáticos no modelo SWAT.

Fonte SWAT 2009

Organizado por Janielson da Silva Lima

4.7.12 Tabela parâmetros estatísticos requerido pelo modelo SWAT.

Para execução do modelo, o SWAT requer a entrada de treze parâmetros estatísticos que se referem à temática clima, depois de realizar todos os cálculos e obtenção de todos os parâmetros os dados são inseridos direto no modelo como mostrado na tabela 6.

Parâmetro	Fórmula	Descrição
TMPMX	$umx_{(mon)} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N}$	Temperatura média máxima diária para cada mês
TMPMN	$umn_{(mon)} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N}$	Temperatura média mínima diária para cada mês
TMPSTDMX	$\hat{\sigma}_{mx_{(mon)}} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - umx_{mon})^2}{N-1}}$	Desvio padrão da temperatura máxima para o mês
TMPSTDMN	$\hat{\sigma}_{mn_{(mon)}} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mon} - umn_{mon})^2}{N-1}}$	Desvio padrão da temperatura mínima para o mês
PCPMM	$\bar{R}_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day,mon}}{yrs}$	Média da precipitação total mensal
PCPSTD	$\hat{\sigma}_{(mon)} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^2}{N-1}}$	Desvio padrão da precipitação diária mensal
PCPSKW	$g_{mon} = \sqrt{\frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^3}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot (\hat{\sigma}_{mon})^3}}$	Coefficiente de deformidade da precipitação diária mensal
PR_W(1,mon)	$Pi(W/D) = \frac{days_{w/D_i}}{days_{dry,i}}$	Probabilidade de ocorrência de um dia seco seguido de um dia chuvoso.
PR_W(2,mon)	$Pi(W/W) = \frac{days_{w/w_i}}{days_{wet,i}}$	Probabilidade de ocorrência de dois dias secos consecutivos
PCPD(mon)	$\bar{d}_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs}$	Número médio de dias com chuva no mês
RAINHHMX(mon)		Máxima intensidade de chuva ocorrida em meia hora
SOLARAV	$urad_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{day,mon}}{N}$	Radiação solar média diária por mês
DEWPT	$udew_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{dew,mon}}{N}$	Temperatura de orvalho média mensal
WNDV	$uwnd_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N U_{wnd,mon}}{N}$	Velocidade média mensal do vento

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos para gerador climático do modelo SWAT.

Fonte SWAT 2009.

Organizado por Janielson da Silva Lima

RESULTADOS ALCANÇADOS COM A MODELAGEM AMBIENTAL

Os resultados alcançados com o processo de modelagem nos mostra dentre diversos fatores a situação quanto à qualidade ambiental referente à produção de sedimento que atualmente a SBHMP apresenta. Para isso, a seguir vamos analisar os seguintes resultados obtidos com as simulações do modelo e as previsões de cenários com diferentes usos.

5.1 Modelo Digital De Elevação

O MDE com resolução de 30 metros foi gerado para a SBHMP conforme a metodologia apresentada no capítulo quatro, sendo aplicada a técnica de *Triangular Irregular – TIN*. Assim, obtivemos cotas mínimas de altitude 75.10m, cotas médias altimétricas de 171,26m e cotas máximas de 250,70m. Com isso observamos que a área de estudo possui baixas cotas altimétricas, sua amplitude está em torno de 175m de altitude para uma área de 771,2 km². A seguir na figura 15 podemos observar o mapa do Modelo Digital de Elevação.

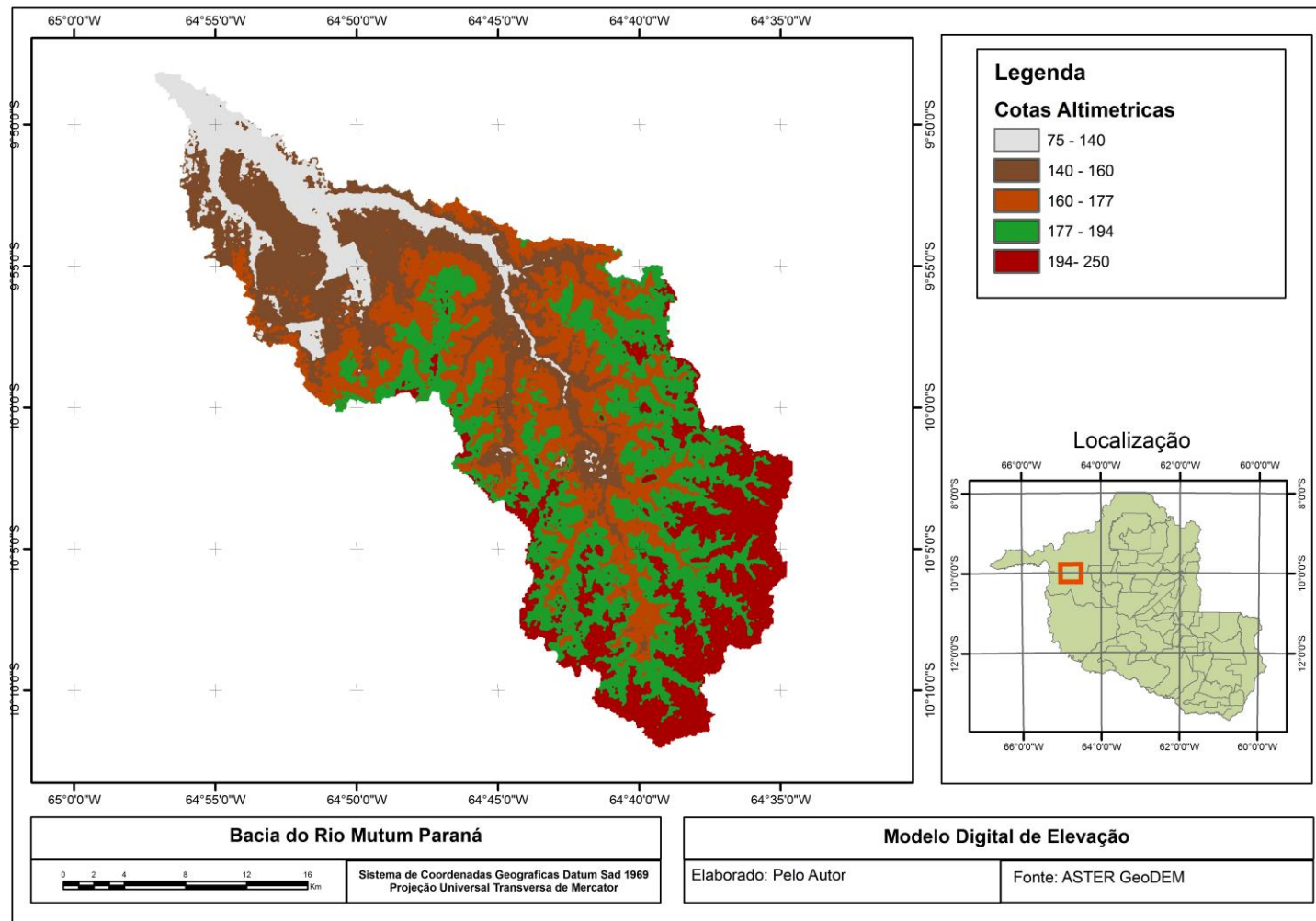


Figura 15 – Mapa Modelo Digital de Elevação.
Organizado por Janielson da Silva Lima

5.2 Sub-divisões da Bacia do Rio Cuiabá

Na aplicação do Modelo SWAT a bacia hidrográfica do Rio Mutum Paraná foi subdividida em 27 sub-bacias. O critério para a divisão das sub-bacias foram os pontos de confluência do rio gerados pelo modelo a partir do MDE; a menor sub-bacia gerada foi a de número 19 com 0,61 km² e a maior foi a sub-bacia 27 com 75,8km². A seguir na figura 16 podemos analisar o mapa das sub-bacias geradas pelo modelo SWAT.

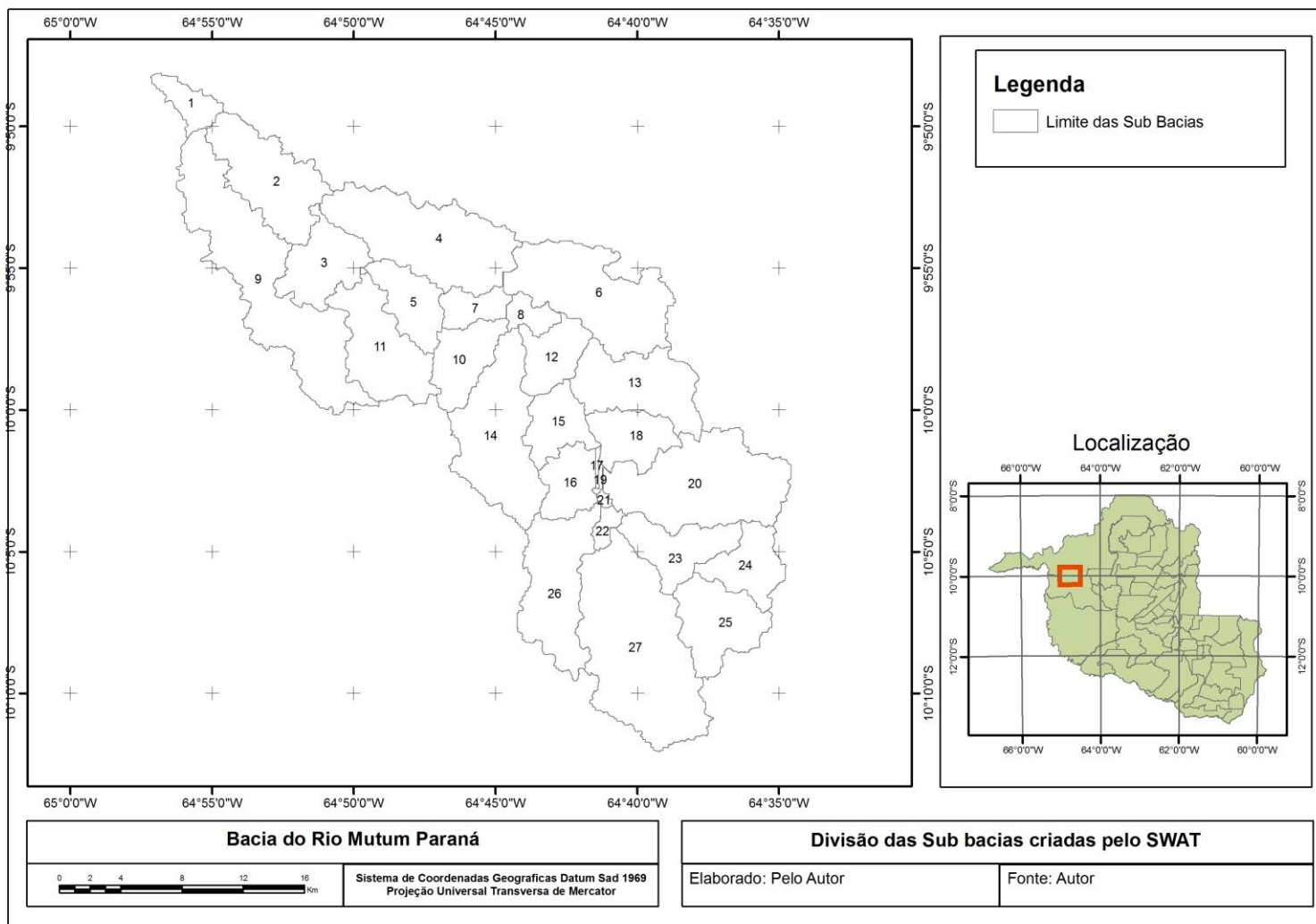


Figura 16 – Mapa divisão das Sub bacias criadas pelo SWAT.
 Fonte: Janielson da Silva Lima.

5.3 Uso e cobertura

Os dados de uso e cobertura foram processados tendo por base os dados de Nunes (2012) e a utilização das técnicas de sensoriamento remoto para classificação supervisionada das classes de uso e cobertura. Para tanto obtivemos três classes de uso para bacia podem ser observados na Figura 17.

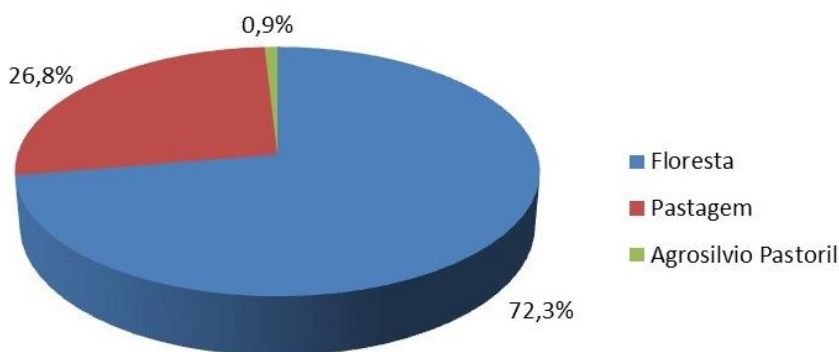


Figura 17: Gráfico de Uso e cobertura
Fonte: Nunes, 2012.
Organizado por Janielson da Silva Lima

A floresta apresenta pouco mais de 72,3%, denotando que ainda há uma boa parte da bacia pouco antropizada pelo homem, a atividade agrosilvopastoril é pouco expressiva na região, e caracterizada por produção consorciada onde apresenta tanto agricultura quanto a criação de gado, seja ele para leite ou corte. A atividade pastagem tem cerca de 26,8%, mesmo a pastagem apresentando uma baixa porcentagem, o uso na região é uma das principais atividades e está em franca expansão devido ao retorno rápido do capital investido tanto para o grande quanto para o pequeno produtor, contudo verificamos que a pecurária é uma atividade que degrada muito o ambiente, bem como os recursos hídricos, principalmente pela falta de conhecimento dos seus usuários, devido o desflorestamento e principalmente a retirada da mata ciliar, deixando as nascentes totalmente desprovidas de qualquer proteção. A seguir na figura 18 podemos analisar o mapa de uso e cobertural vergal da bacia.

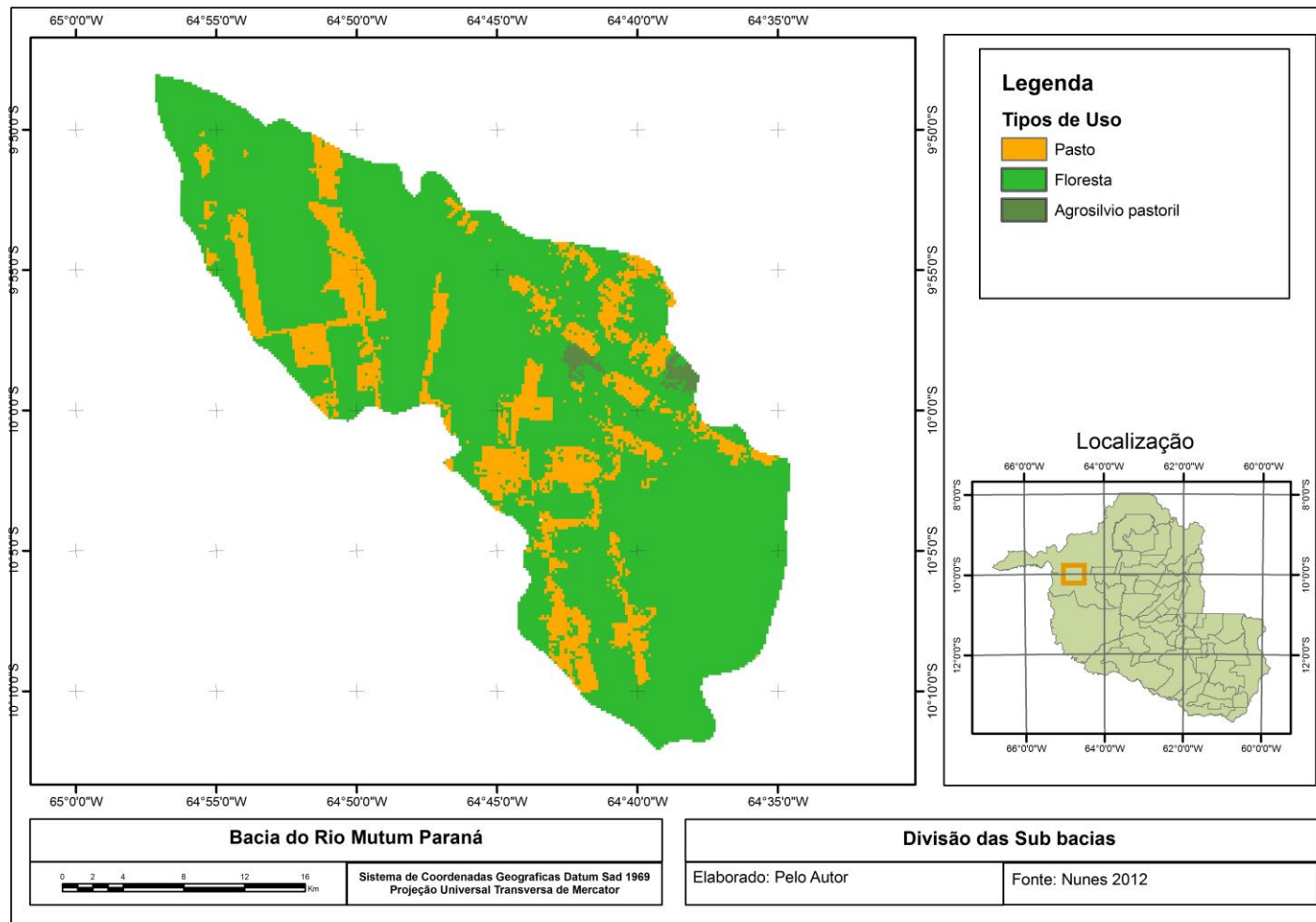


Figura 18 – Mapa divisão das Sub bacias criadas pelo SWAT
Organizado por Janielson da Silva Lima

5.4 Dados Tabulares de Climáticos

Com base nas informações da estação meteorológica da SEDAM, foram calculados os parâmetros estatísticos requeridos pelo gerador climático do SWAT e estão apresentados na Tabela 07 a seguir.

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30.3	29.9	31.1	31.8	31.6	31.5	32.6	34.4	34.7	33.4	31.8	30.8
TMPMN	23.3	22.4	5.9	22.7	22	21	19.3	19.6	21.6	22.6	23.1	22.7
TMPSTDMX	2.2	2.4	1.8	1.8	1.1	2.2	2.4	1.7	2.4	1.9	2.2	2.1
TMPSTDMN	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	1.6	1.9	1.7	1.1	0.6	0.5	0.7
PCPMM	10.7	12.4	8.4	5.5	4.9	4.3	0.2	1.9	3.7	3.9	8.7	11.1
PCPSTD	16.2	17.1	14.5	7.5	14.7	8.5	0.2	10.5	10.6	9.6	16.3	20.5
PCPSKW	2.5	2.3	2.4	1.6	3.6	2.2	0	6	3.7	3.7	2.3	2.9
PR_W1	0.93	0.73	0.34	0.5	0.19	0.16	0.1	0.11	0.18	0.11	0.12	0.33
PR_W2	0	0	0.11	0.3	0.72	0.1	0.145	0.67	0.58	0.25	0.36	0.15
PCPD	28	25	22	24	15	12	1	3	13	15	19	22
RAINHHMX	14.8	34.8	24.9	18.2	15.4	17.2	25.2	35.4	18.8	33	16	15.8
SOLARAV	13.5	13.3	15.3	14.6	15.1	15.8	17.7	18.8	18.1	17	14.1	15
DEWPT	19.9	22.6	22.9	23.4	22.7	22	20.3	20.2	22.3	23.2	23.5	23.1
WNDVAV	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	1.6	1.6

TMPMX: Temperatura máxima (°C); TMPMN: Temperatura mínima (°C); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C); TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C); PCPMM: Precipitação média (mm); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação (mm); PR_W1: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%); PR_W2: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%); PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima; PCPD: Número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm); SOLARAV: Radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹); DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho (°C); e WNDVAV: Velocidade do vento (m s⁻¹).

Tabela 7 – Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da Estação Meteorológica.

Fonte: SEDAM

Organizado por: Janielson da Silva Lima

5.5 Análise da Dinâmica da Água e Sedimento na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Mutum Paraná.

Todo o processo de modelagem executado pelo modelo SWAT é iniciado a partir da precipitação, pois o modelo entende que a precipitação é o início do ciclo hidrológico, por conta disso acaba sendo um dos principais dados a serem inseridos no modelo. Dessa maneira, todos os resultados de balanço hidrológico e de propagação, tanto de água quanto de sedimentos, simulados pelo SWAT são dependentes da quantidade de água precipitada na bacia.

O escoamento superficial é o saldo das interações da água na fase de simulação da bacia vertente do modelo SWAT. Suas variações evidenciam o quanto a caracterização física da bacia é fundamental para determinar a quantidade de água que irá efetivamente escoar sobre a superfície, gerando o processo de desagregação e de transferência dos sedimentos para o canal aluvial (aporte de sedimentos). A seguir na figura 19 podemos observar todos os valores médios totais, de todas as etapas que fazem parte do ciclo hidrológico simulados pelo SWAT para a SBHMP.

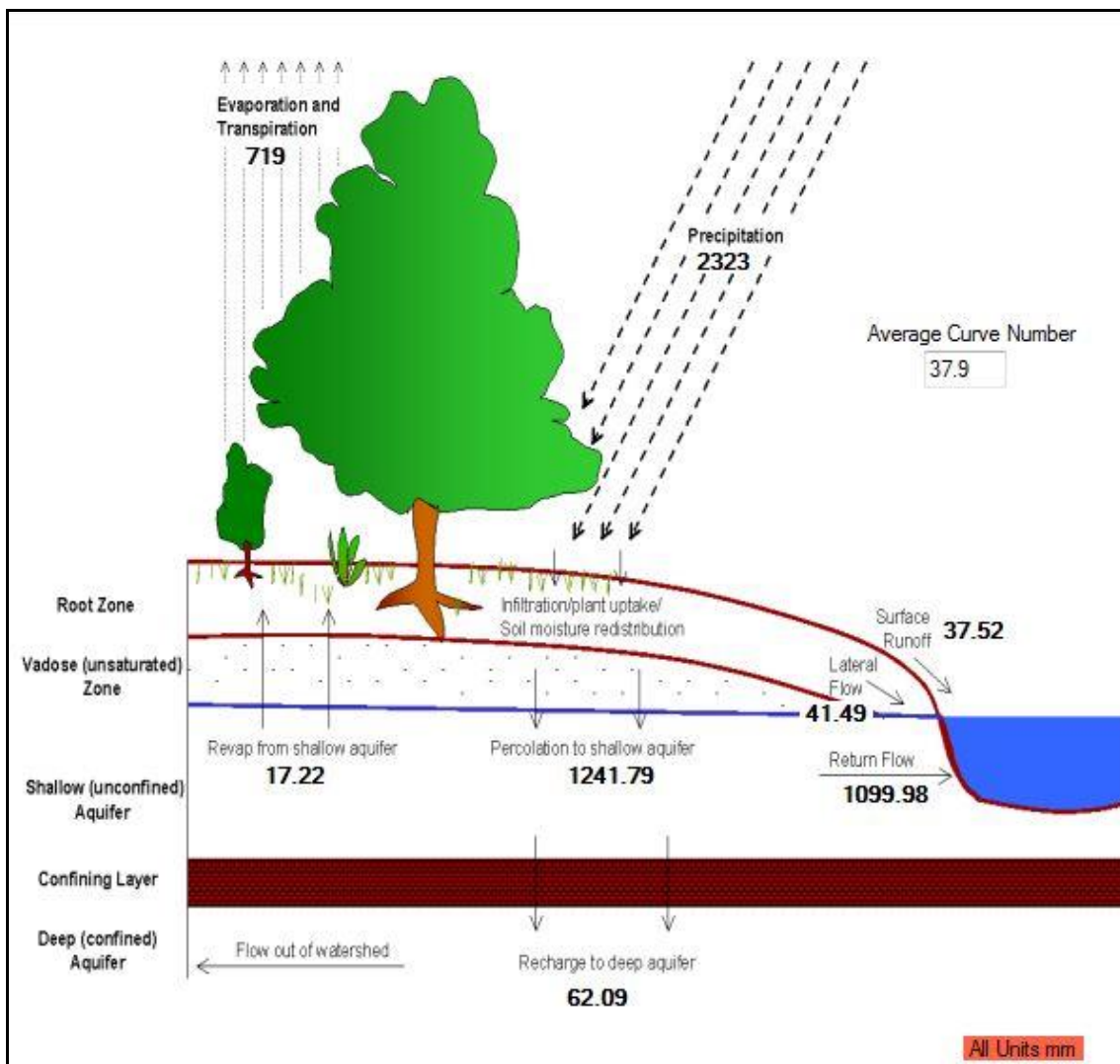


Figura 19 – Ciclo de entrada e saída da água, com base no funcionamento do modelo SWAT. Fonte: SWAT 2009.

Organizado por Janielson da Silva Lima

Quando o escoamento superficial, juntamente com os sedimentos transportados, alcança a rede de drenagem, inicia-se a fase terrestre do modelo, onde a vazão líquida e a produção de sedimentos são os resultados decorrentes dessa propagação de água e

sedimentos pelo canal. Nessa fase são simulados processos de agradação e degradação do canal resultante de um balanço entre a capacidade de transporte do escoamento e a carga disponível para transporte no canal.

A análise dos resultados das simulações do escoamento superficial, vazão líquida e produção de sedimentos, por representarem tanto a fase de bacia quanto de canal, podem justificar a validade ou não do modelo SWAT ser aplicado para simulações hidrossedimentológicas na SBHMP.

Na análise de dinâmica da água e sedimento realizamos testes e simulações com o modelo, objetivando a melhor forma de representar essa complexa dinâmica dentro da bacia de forma que possamos compreender os processos. A seguir na figura 20 podemos observar os dados de Precipitação média mensal da SBHMP.

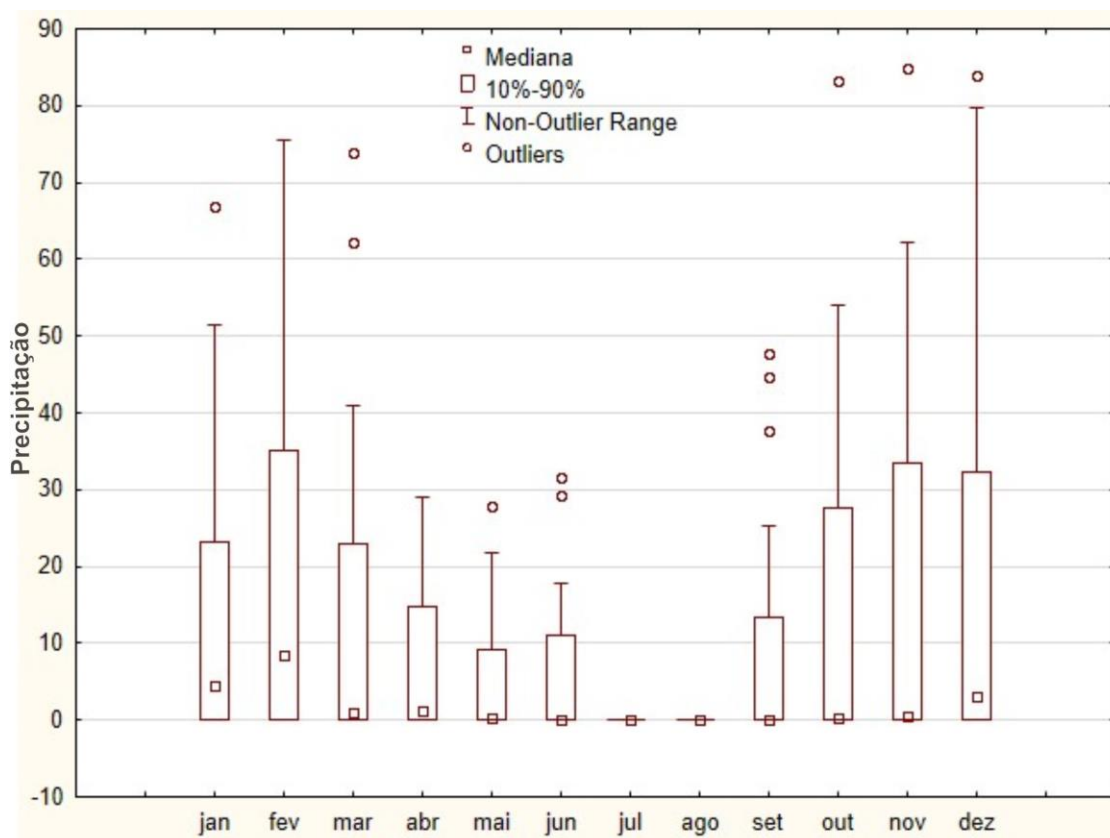


Figura 20 – Gráfico boxplot com Precipitação média mensal da SBHMP.

Fonte: Finep 2014.

Organizado por Janielson da Silva Lima

O gráfico acima nos mostra que a região apresenta *déficit* de precipitação iniciando no mês de maio onde começa a existir uma queda nos índices pluviométricos, em junho retoma uma pequena ascensão, contudo nos meses de julho e agosto, a estação seca se estabelece e volta somente a chover em setembro. Os *outliers* são registros de

valores discrepantes com o restante da série de dados, sendo assim, os valores discrepantes ocorreram nos meses de janeiro, março, maio, junho, setembro, outubro, novembro e dezembro, variando de 13, 67mm a 84.8mm. Se considerarmos que as dinâmicas climáticas da região da área de estudo oscilam de 2 a 5 meses, na região é provável que tenhamos fenômenos que expliquem essa sazonalidade nos meses com baixa precipitação.

O escoamento superficial gerado na bacia é resultante da diferença entre o volume de água precipitado e o volume infiltrado, sendo o principal componente do balanço hídrico responsável pela desagregação e o transporte de sedimentos (aporte de sedimentos), uma vez que o SWAT utiliza a Equação Universal Modificada (MUSLE) para simular esses processos. Nessa equação, conforme já apresentado, os valores do volume escoado superficialmente combinados com a vazão de pico condicionam a desagregação e a transferência dos sedimentos para o canal aluvial. Assim, se o solo apresentar altos valores de condutividade hidráulica e as condições de superfície de solo permitam um fluxo contínuo de água, é esperado que grande parte do volume precipitado possa infiltrar no solo, o que resultaria em escoamentos superficiais de pouco volume e, conseqüentemente, haveria uma capacidade reduzida desse em provocar erosão. Dessa maneira, a análise dos resultados do escoamento superficial (SURQ) simulados pelo modelo SWAT podem explicar as produções de sedimentos resultantes das simulações, ou seja, pode-se compreender a sequência de cálculos intermediários que resultam em um montante de sedimentos que é gerado na bacia vertente e transferido para o canal aluvial.

5.6 Análise e validação da Vazão e produção de Água.

Com o intuito de avaliar o modelo e torná-lo amplamente aplicável, os valores de vazão observados no período de janeiro de 2012 a dezembro 2013 serviram como base para validação. Desta forma, correlacionamos os dados de vazão simulados⁹ com vazão observados em campo. Nas figuras 21 e 22 podemos analisar os resultados.

⁹ Vazão simulada pelo modelo SWAT.

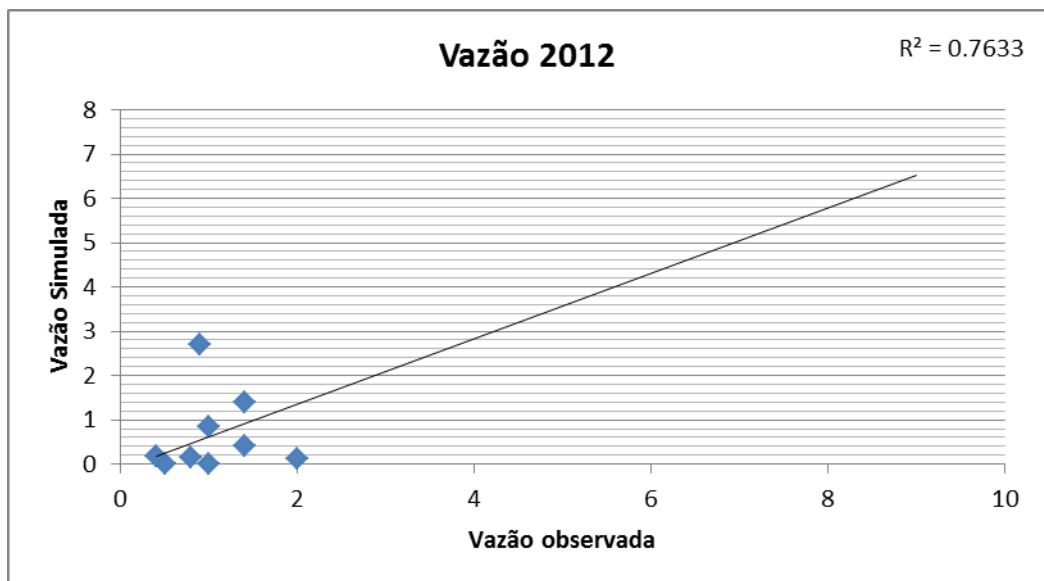


Figura 21 – Gráfico de dispersão correlacionando vazão líquida observada e vazão líquida simulada do ano de 2013.

Fonte: Finep 2014

Organizado por Janielson da Silva Lima

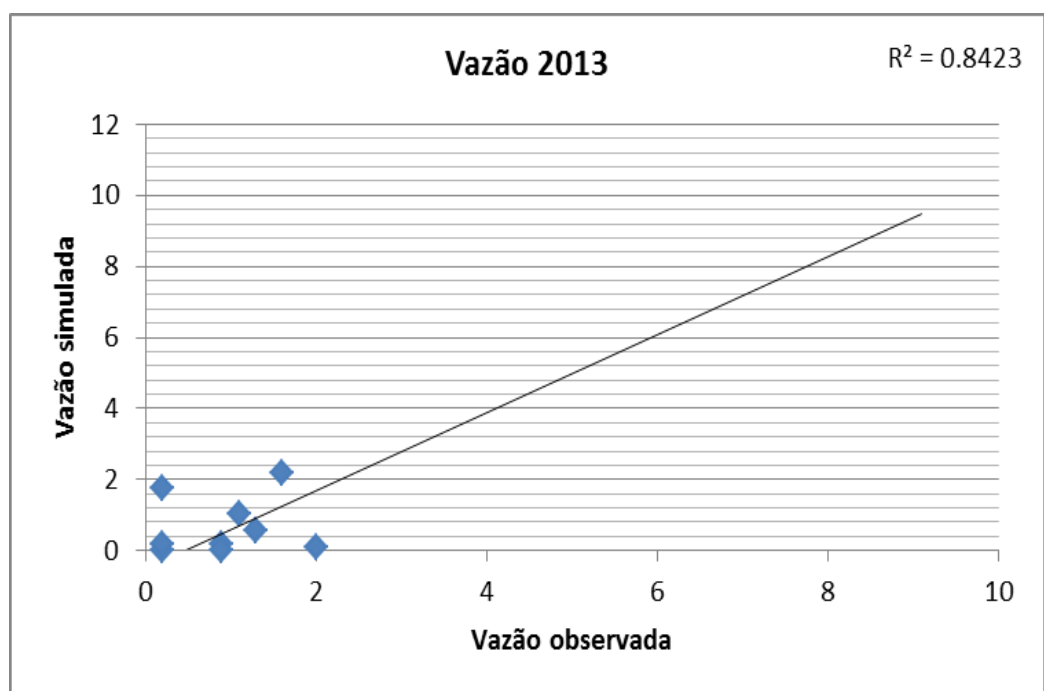


Figura 22 – Gráfico de dispersão correlacionando vazão líquida observada e vazão líquida simulada do ano de 2013.

Fonte: Finep 2014.

Organizado por Janielson da Silva Lima

De modo geral, os dados de vazão tiveram um bom ajuste, tendo em vista que, observando o gráfico de dispersão dos dados obteve-se uma alta correlação em ambos os anos, contudo constatamos que o modelo subestima os dados durante alguns meses do ano.

Govender & Everson (2005), ao simularem vazão em uma pequena bacia hidrográfica (0,68 km²), localizada na África do Sul, verificaram, ao fim dos seus

estudos, que o modelo SWAT apresentou melhores resultados em anos secos do que em anos úmidos, superestimando os dados de vazão em anos úmidos semelhante ao que ocorreu nas simulações da SBHMP. Esse diferente comportamento do modelo para anos úmidos e secos pode estar vinculado à dificuldade do modelo simular a água disponível no solo durante os períodos úmidos.

Ainda temos que levar em consideração o fato de que as simulações de vazão líquida também devem ser consideradas umidade do solo, pois a vazão é a resposta final do comportamento hidrológico da bacia. Assim, quanto maior a umidade do solo, maior é o escoamento superficial e, conseqüentemente, mais rápida é a transferência de água precipitada para dentro do canal. Caso contrário, se a taxa de infiltração for alta, essa transferência passa a ser subterrânea e ocorre mais lentamente. Dessa forma, se o modelo não simular adequadamente a umidade do solo, os valores resultantes de vazão líquida simulada não se aproximarão dos valores observados, pois pode ocorrer tanto superestimação como subestimação dos resultados.

Butcher (2001) afirma que o SWAT não dispõe de um completo balanceamento de massa dos componentes que simulam a água subterrânea, sendo este um problema comum em modelos para bacias hidrográficas. A representação do tempo de resposta da água subterrânea é maior que o passo de tempo para a simulação dos processos que ocorrem na superfície.

Van Liew & Garbrecht (2003) justificam que as discrepâncias encontradas entre os valores observados e simulados para a vazão líquida são resultantes de simplificações no equacionamento do fluxo de subsuperfície e da transmissão das perdas na fase de canal. Sendo assim, os gráficos de dispersão, com dados medidos e simulados de vazão líquida, apresentaram um resultado bastante satisfatório, subestimação 8,77m³, e em 2013 subestimando 3,26m. Considerando que os resultados tendem a melhorar a medida que aumenta-se os intervalos de tempo de simulações, e aumentando série de dados observados.

A produção de água no ano de 2012 variou de 73mm a 76mm neste ano citado, as sub-bacias que mais produziram água foram as sub-bacias 1, 12, 13 e 6, no ano de 2013 somando-se as outras às sub-bacias 7, 10 23, 24 e 25, essa maior produção de água deve-se ao fato dessas áreas serem mais preservadas. Onde não há retirada da floresta ocorre o mínimo de perda de água no sistema tornando a produção mais eficaz. Na Figura 23 podemos observar a produção de água nos períodos de 2012 e 2013.

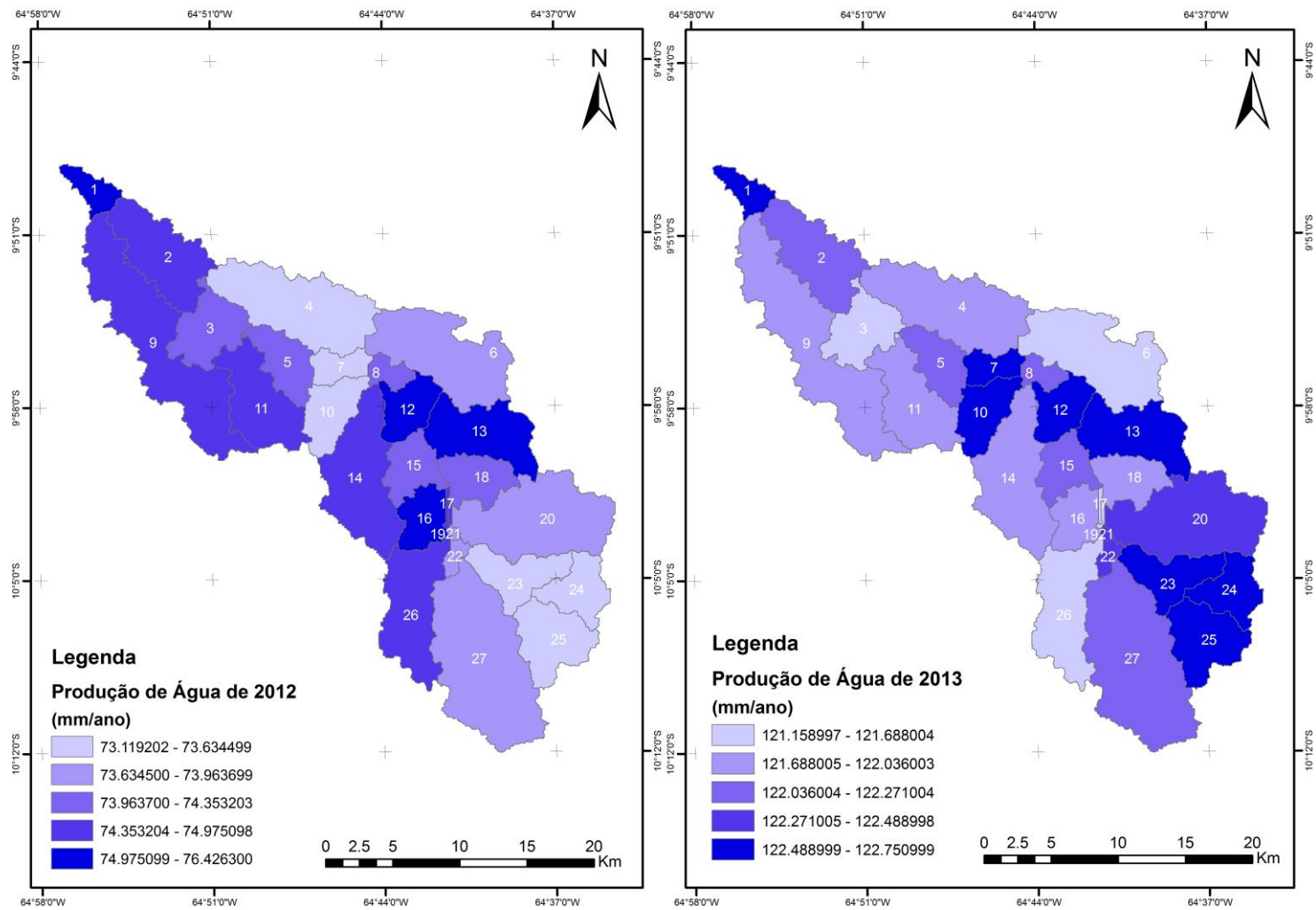


Figura 23 – Produção de água período de 2012 e 2013.
 Fonte Janielson da Silva Lima

5.7 Análise da simulação da produção de sedimento na Sub-bacia Mutum Paraná

Segundo Yitayew *et al.* (1999), quando muitas vertentes são combinadas em uma única sub-bacia, efeitos como a deposição e erosão em canais podem aumentar ou diminuir a produção de sedimentos. A MUSLE foi originalmente aplicada para rampas uniformes, uma de suas limitações é não considerar rampas desuniformes em bacias hidrográficas. De acordo com o próprio conceito do fator LS, quanto maior o comprimento de rampa, maior será a perda de solo. Segundo Brown *et al.* (1981) e Jong *et al.* (1983), quando se consideram rampas não uniformes pode ocorrer o inverso, isto é, quanto maior o comprimento de rampa, maior a possibilidade de haver deposição de sedimentos ao longo dela.

O aporte de sedimento, calculado pelo modelo SWAT, tem por base a equação Universal Modificada de Perda de Solo – MUSLE (Williams, 1975). Quando realizada a transferência desses sedimentos gerados nas sub-bacias para o canal, inicia-se a propagação destes para fora da bacia hidrográfica, sendo neste estudo considerada como produção de sedimentos a descarga sólida que passa pelo ponto de controle selecionado (exutório). A MUSLE é aplicada em cada HRU (Unidade de Resposta Hidrológica) que compõe as sub-bacias. O somatório do aporte de sedimentos gerados pelas HRU's que compõem uma sub-bacia é o aporte de sedimentos total dessa sub-bacia. Vamos considerar uma sub-bacia qualquer, para a sub-bacia, o processo de aporte de sedimento é iniciado no seu ponto mais alto, após encontrar um canal de drenagem, ocorre a propagação desse aporte de sedimentos até o exutório. No ponto de saída de cada sub-bacia há pontos de controle intermediários, que contabilizam a produção de sedimentos de cada sub-bacia, o resultando desse processo é a produção de sedimento.

A produção de sedimento da SBHMP no ano de 2012 variou entre os valores de 0,11 ton/ha/ano a 3.44 ton/ha/ano, as sub-bacias que tiveram maior produção de sedimento foram as sub-bacias 12, 13 e 16. No ano de 2013 os maiores índices de produção de sedimento foram nas mesmas sub-bacias, porém, no referido ano houve uma menor produção de sedimento variando entre 0,000417 a 2,357920 ton/ano, essa menor produção de sedimento pode ser explicada pelo fato de que no ano de 2013 ter ocorreu menores índices pluviométricos do que no de 2012. A seguir podemos observar na Figura 24 a produção de sedimento dos anos de 2012 e 2013. Na figura 25 podemos analisar a Relação entre a produção água observada com produção de sedimento simulada.

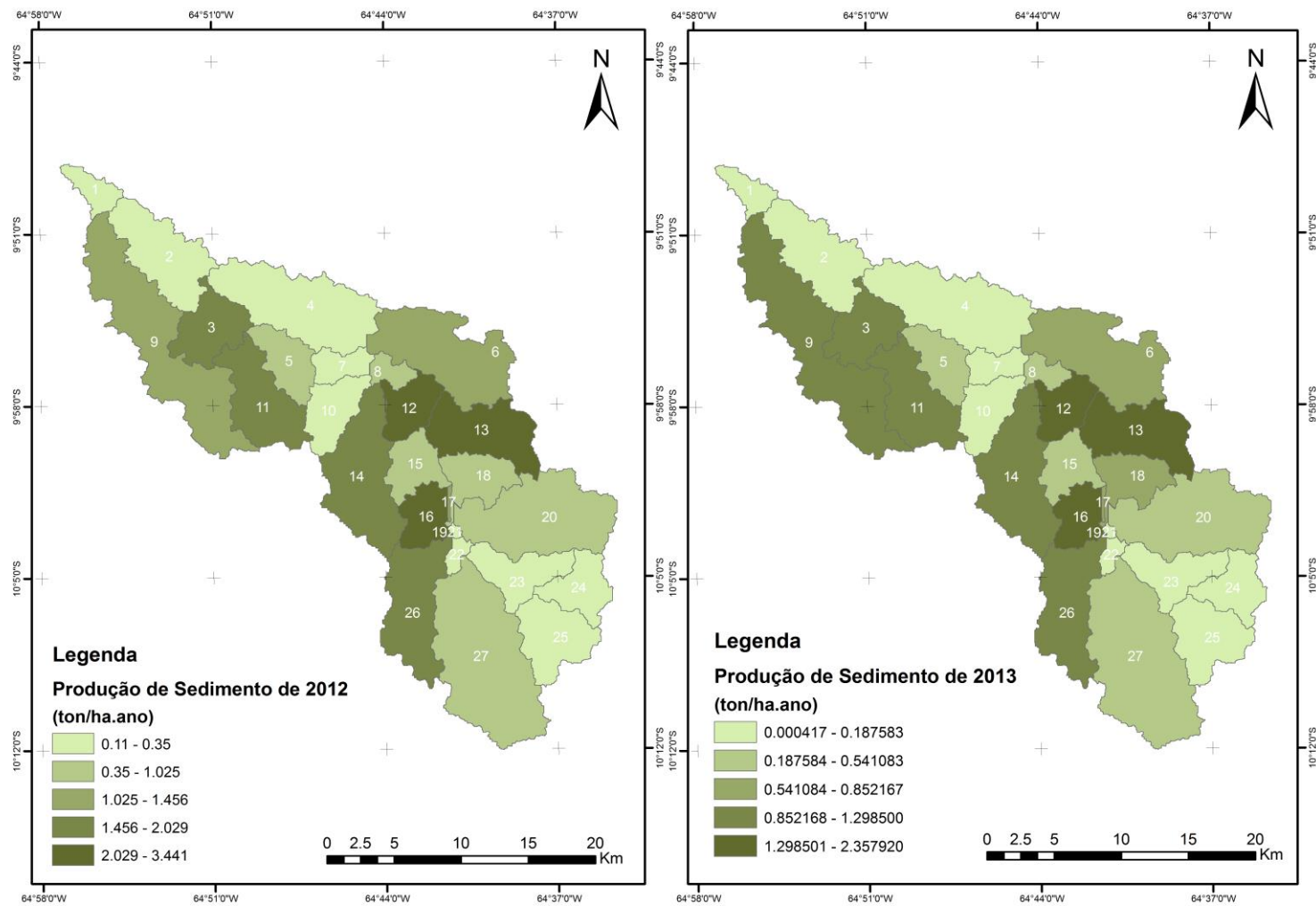


Figura 24 – Produção de sedimento nos anos de 2012 e 2013.
 Fonte: Janielson da Silva Lima

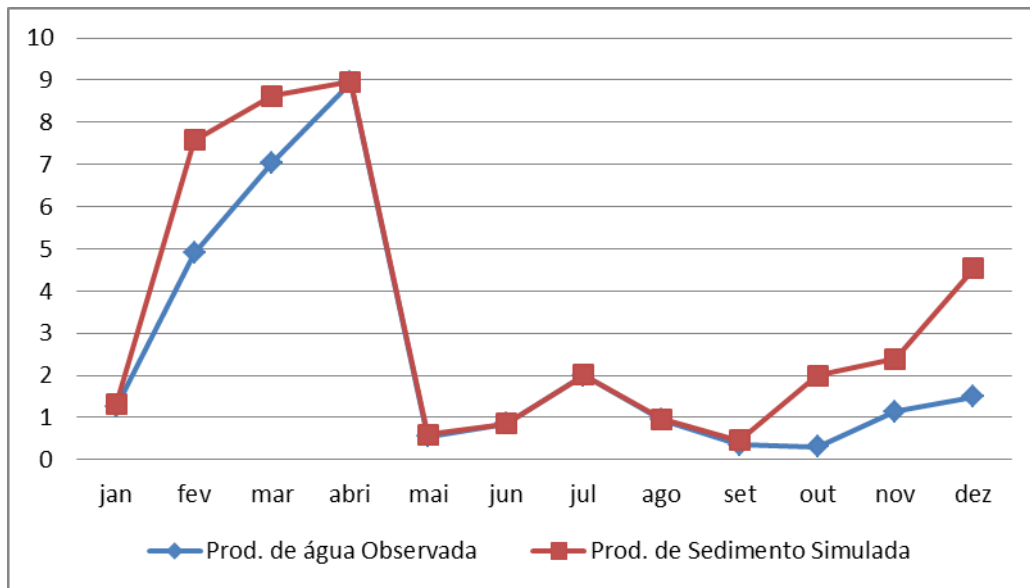


Figura 25 – Relação entre a produção de água observada com produção de sedimento simulada.
Fonte: Janielson da Silva Lima

Na análise das simulações de produção de água deve ser considerada a umidade do solo, pois a produção de água é a resposta final do comportamento hidrológico da bacia. Assim, quanto maior a umidade do solo, maior é o escoamento superficial e, conseqüentemente, mais rápida é a transferência de água precipitada para dentro do canal. Caso contrário, se a taxa de infiltração for alta, essa transferência passa a ser subterrânea e ocorre mais lentamente. Dessa forma, se o modelo não simular adequadamente a umidade do solo, os valores resultantes de vazão líquida simulada não se aproximarão dos valores observados, pois pode ocorrer tanto superestimação como subestimação dos resultados.

A Figura 25 faz uma relação entre a produção de água (observada) e produção de sedimento (simulada) no qual, os meses de janeiro, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, a produção de sedimento (simulada) foi totalmente proporcional à produção de água.

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica engloba dois conceitos básicos: primeiro, que haja disponibilidade de material suscetível de ser transportado e segundo, que o escoamento tenha capacidade motora de fluxo para transportar esse material.

O material disponível para transporte existente nas vertentes da bacia tem sua origem na erosão causada pelo impacto da gota da chuva sobre o solo. Por outro lado, na calha dos rios esse material provém da erosão das margens, do fundo e da descarga de abastecimento de montante. Sendo assim, maiores índices de pluviosidade são

proporcionais a maiores índices de produção de sedimento e menores índices de pluviosidade resultam em menores índices de produção de sedimento. Observe a Figura 26 – gráfico de precipitação medial mensal dos meses de 2012 e 2013.

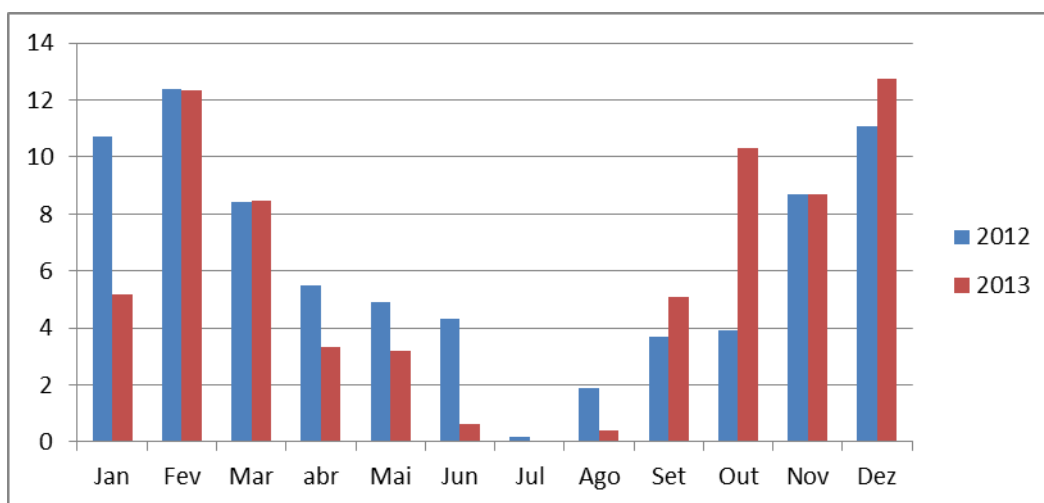


Figura 26 – Gráfico de precipitação media mensal dos meses de 2012 e 2013.

Fonte: Finep 2014.

Organizado por Janielson da Silva Lima

Com base nas observações anteriores, o modelo nos dá uma resposta satisfatória quanto a esse processo de simulação da produção de sedimento, considerando as proporcionalidades dos outros parâmetros analisados, como precipitação (observada) e produção de água (observada).

De acordo com Carvalho (1994), o comportamento de uma bacia em relação ao sedimento é muito variável desde as partes mais altas até as planícies. Isso depende das rochas e solos, da cobertura vegetal, das declividades, do regime de chuvas, bem como de diversos outros fatores. De um modo geral, na parte alta da bacia há maior erosão e transporte de sedimentos. Na parte baixa da bacia normalmente há menor taxa de erosão, ocorrendo formação de depósitos com forte processo de agradação.

No caso da SBHMP, o fator determinante para a produção de sedimento é a cobertura vegetal, pois as maiores taxas de produção de sedimento estão localizadas na parte média da bacia, mais precisamente nas sub-bacias 12, 13 e 16, onde a floresta está altamente alterada e as principais atividades encontradas ali são a pecuária para criação de gado de corte e o sistema agrosilvopastoril. Nas sub-bacias de cabeceiras e no exutório, a produção de sedimento é menor, por conta da floresta ser mais preservada, a produção de sedimento tende a ser mais baixa devido essa cobertura, ocorrendo somente a produção de sedimento natural no sistema.

5.8 Simulação de cenários hipotéticos de uso e cobertura

Neistch *et. al.* (2005) afirmam que o modelo SWAT permite que diferentes processos físicos na bacia sejam simulados, com o objetivo de analisar os impactos das alterações ocorridas na bacia sobre o escoamento, a produção de sedimento e qualidade da água.

Com objetivo de estimar as possíveis alterações hidrossedimentológicas devido a diferentes usos e cobertura, fizemos a simulação de 3 possíveis cenários de uso e cobertura, que podem servir como guia para as ações presentes de forma a evitar ou reduzir os impactos ambientais dos diversos usos da sub-bacia Mutum Paraná.

O Cenário 1 visou representar a bacia sem alterações antrópicas, ou seja, toda a bacia estava coberta por floresta. Nesse cenário espera-se redução da produção de sedimentos devido a proteção vegetal oferecida pela floresta juntamente com a inexistência de revolvimentos no solo, ficando a produção de sedimentos vinculada principalmente à erosão não-antrópica.

No Cenário 2, o uso selecionado para a simulação da produção de sedimento foi a pastagem, que atualmente é o uso predominante na bacia, utilizado amplamente para criação de gado de corte e leiteiro, esse tipo de uso e cobertura é comum por termos maiores níveis de produção de sedimento, devido a retirada da floresta resultando na maior facilidade do desprendimento do material (solo), por conta da falta de cobertura vegetal para mantê-lo protegido.

Na simulação do Cenário 3, optamos pelo solo exposto, no qual apresenta uma situação ainda incipiente na área de estudo, mas com o avanço das atuais práticas de uso se tornarem cada vez mais homogêneas na bacia, esse quadro tende a se agravar.

Devido à incorporação direta de dados de clima, uso e cobertura do solo, há a possibilidade de utilização do modelo em simulação de cenários de uso e cobertura que tragam menores impactos na bacia. Os efeitos da variação no uso da terra sobre a produção de sedimentos foram calculados fazendo as simulações para os três cenários e comparando-os com o cenário de uso atual. A seguir podemos observar a figura 27 mostrando os resultados de produção de sedimento como forma de comparação entre os três cenários de uso e da terra acima descritos.

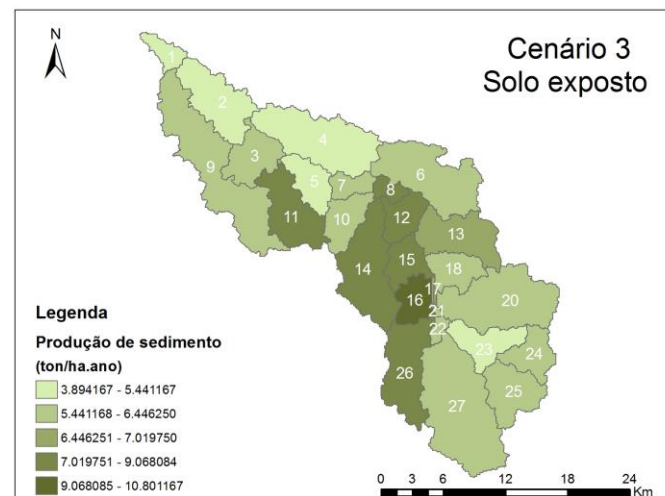
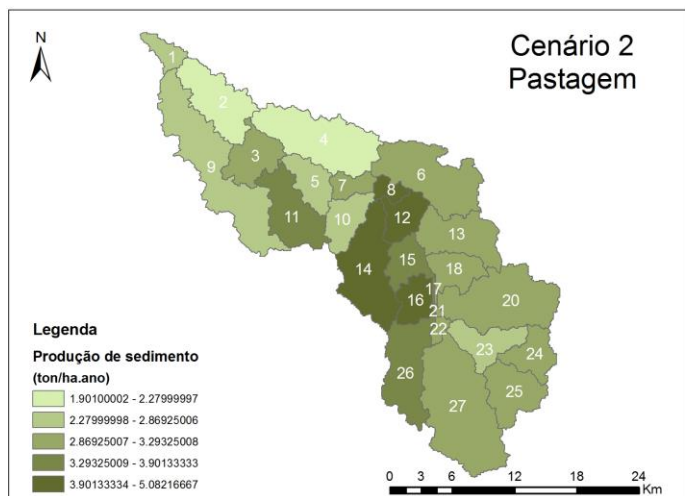
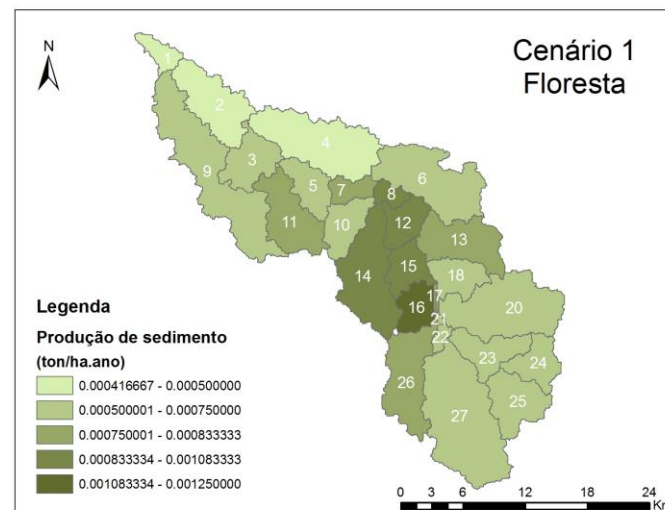
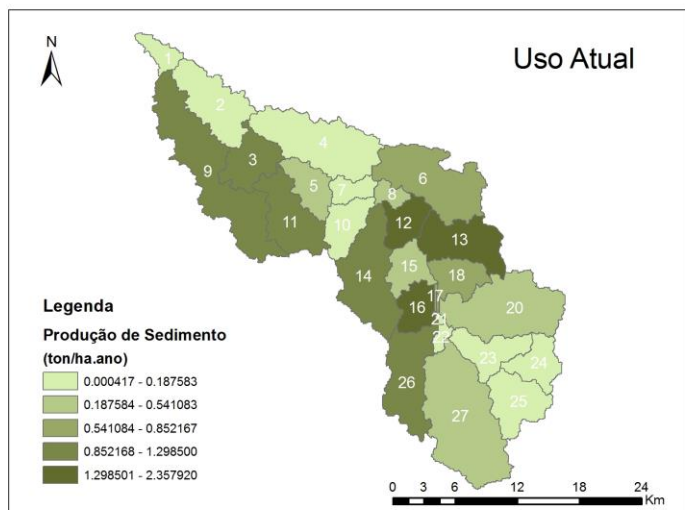


Figura 27 – Produção de sedimento dos cenários hipotéticos.
Fonte: Janielson da Silva Lima

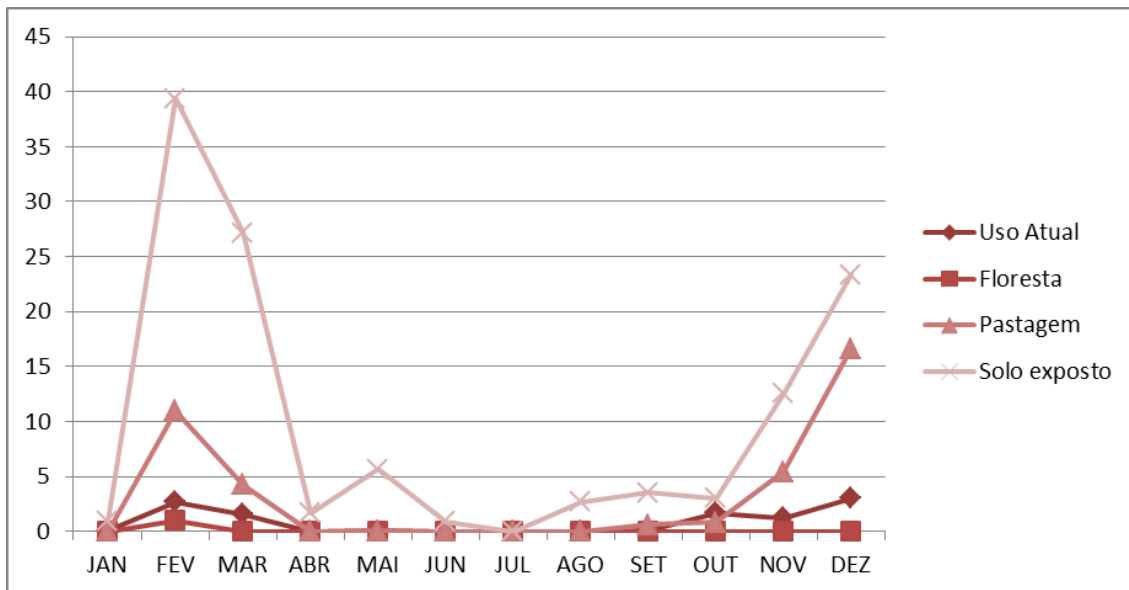


Figura 28 – Gráfico da produção de sedimentos dos cenários hipotéticos.
Fonte: Janielson da Silva Lima.

Analisando o gráficos podemos identificar que o Cenário 1 (floresta) obteve baixíssimos valores de produção de sedimento variando entre 0,000416667 ton/ha/ano a 0,00125 ton/ha/ano, no cenário 2 (Pastagem), os índices de produção de sedimento foram mais elevados, variando entre pouco mais de 1,90 ton/há.ano a 5,082 ton/há.ano, para o cenário 3 (solo exposto) a variação foi bem acima apresentando valores significativos entre cerca de 1,90 ton/há.ano a 10,80 ton/há.ano.

Os valores do cenário 1 são condizentes com seu tipo de cobertura, bacias que não apresentam nenhum tipo de alteração antrópica e são mantidas preservadas, sua produção de sedimento será somente a produção natural, resultado desse ambiente intocado, pois entende-se que essa cobertura atuaria como uma barreira de proteção aos sedimentos, principalmente no sentido de reduzir a velocidade de escoamento, e consequentemente, agir como filtro, retendo essa produção.

O cenário 2 já apresenta valores significativos, pois se uma bacia tem como sua principal atividade a pastagem, os valores de produção de sedimento serão elevados, por conta da falta que a floresta faz no processo de filtragem do material desprendido, bem como o amortecimento das gotas de chuva que caem no superfície, sendo assim, o solo desprotegido será muito mais propenso a produzir cargas sedimentares elevadas.

O cenário 3 resultou em altíssimos níveis de produção de sedimento apresentando valores entre 3,894 ton/há.ano a 10,80 ton/há.ano, isso deve-se por conta do solo não possui nenhuma cobertura tornando desprotegido da água da chuva, e com isso facilitando o desprendimento do material fino para ser escoado até os níveis mais

baixos chegando ao canal de drenagem, assim refletindo diretamente nos índices de turbidez do rio.

O escoamento superficial gerado na bacia é resultante da diferença entre o volume de água precipitado e o volume infiltrado, sendo o principal componente do balanço hídrico responsável pela desagregação e o transporte de sedimentos (aporte de sedimentos), uma vez que o SWAT utiliza a Equação Universal Modificada (MUSLE) para simular esses processos.

Consideremos um solo que apresenta altos valores de condutividade hidráulica e condições de superfície de solo que permitam um fluxo contínuo de água, é esperado que grande parte do volume precipitado possa infiltrar no solo, o que resultaria em escoamentos superficiais de pouco volume e, conseqüentemente, haveria uma capacidade reduzida desse em provocar erosão.

Na SBHMP os valores de escoamento superficial apresentam resultados que condizem e reforçam os valores de produção de sedimento. O cenário 1 apresentou valores entre 0,002mm a 7,5mm, um ambiente florestado resulta em menores índices de escoamento superficial, tendo em vista que a vegetação faz o papel de interceptação e retenção da água, assim diminuindo a eficácia do escoamento e impedindo que o sedimento chegue até a rede de drenagem. A seguir na figura 29 podemos observar o gráfico de escoamento superficial mensal dos cenários hipotéticos.

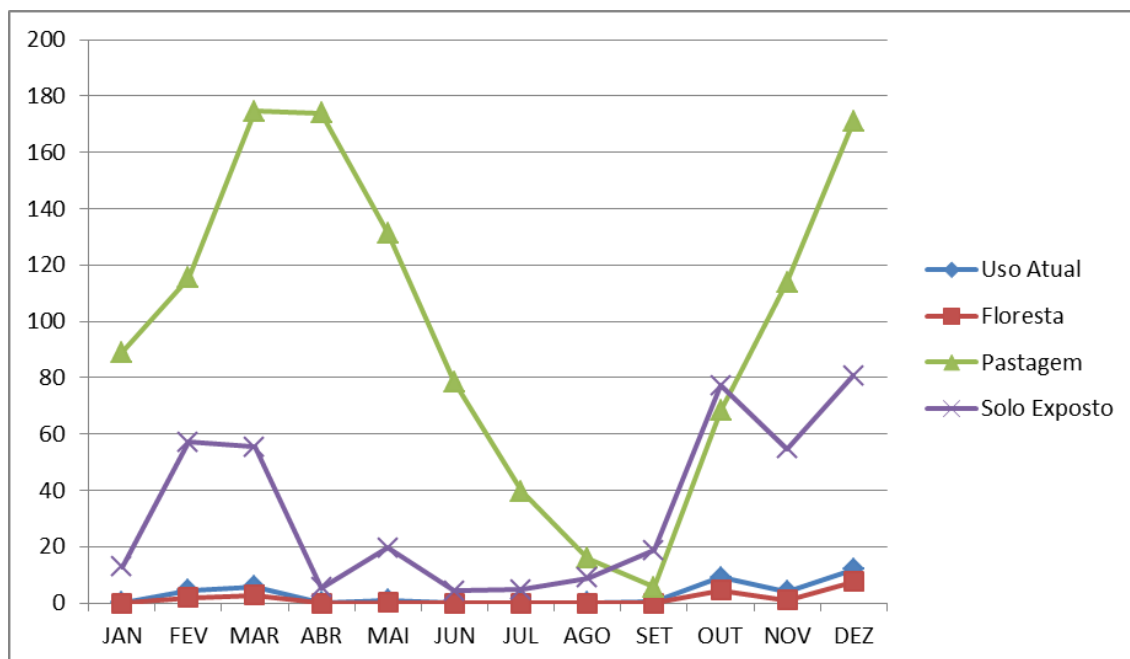


Figura 29 – Gráfico de escoamento superficial mensal dos cenários hipotéticos.
Fonte: Janielson da Silva Lima

O cenário 02 apresenta valores altíssimos de escoamento superficial variando entre 88,9mm a 170,8mm. Esses valores são inversamente proporcionais ao cenário, pois à medida que o cenário 1 apresenta uma área natural sem alteração antrópica, o cenário 2 representa a pecuária, principal uso da área de estudo, sendo assim enquanto o primeiro cenário detém baixos índices de escoamento devido a presença da vegetação, o cenário 2 resulta em índices elevados, mediante o tipo do uso e cobertura que é hipoteticamente exercido na área.

Altos índices de escoamento superficial em áreas de pastagem podem estar associados com o pisoteio do gado, tendo em vista que o solo torna-se mais propenso a ser compactado, diminuindo os espaços entre as partículas de solo, tornando o processo de infiltração muito lento e resultando significativamente para o acúmulo de água na superfície para então ser escoada até o canal de drenagem. A baixo, podemos observar a figura 30 com o gráfico de vazão dos cenários hipotéticos.

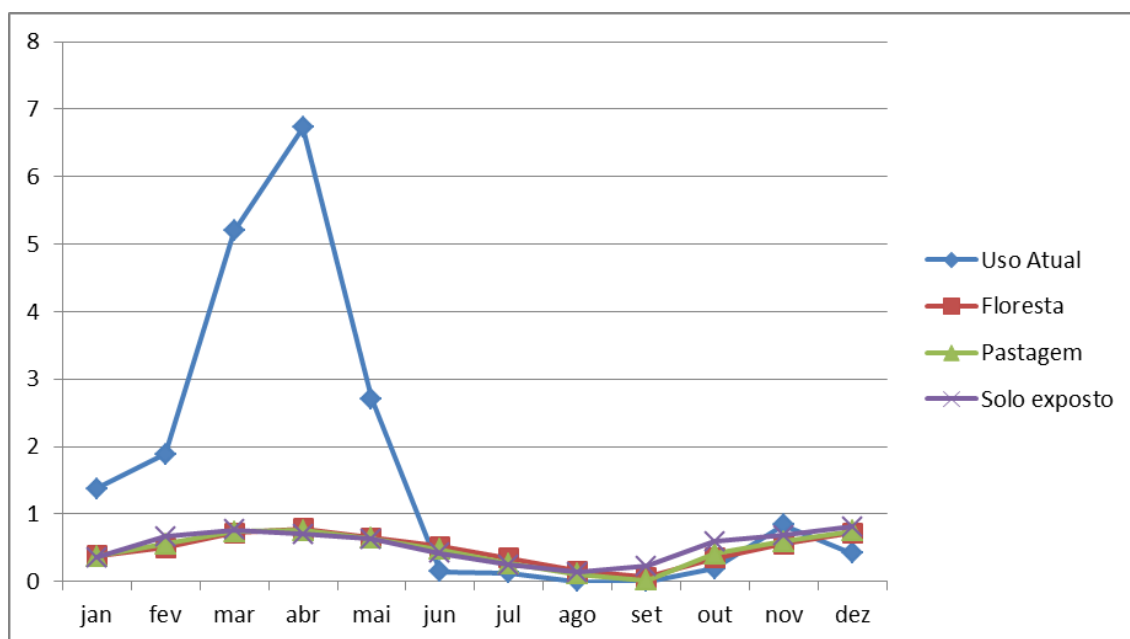


Figura 30 – Gráfico de Vazão dos cenários hipotéticos.
Fonte: Janielson da Silva Lima

O cenário 3 resultou em valores médios de escoamento, tendo como base o cenários 1 e 2. Esses valores semelhantes podem ser associados não por conta do tipo de uso da terra, mas por conta do relevo plano da região, em apenas porções da bacia sendo suavemente ondulado, assim, os valores de escoamento superficial representados na figura do gráfico 31 são entre 12,7mm a 80,7mm.

CONCLUSÃO

A utilização de modelos na Amazônia ainda tem sido pouco frequente, este fato foi percebido na fase de pesquisa bibliográfica referente ao tema em questão, as razões geralmente podem estar associadas a fatores que tornam sua utilização um pouco árdua como a indisponibilidade de dados de monitoramento hidrossedimentológico, sendo um dos principais problemas identificados na utilização desta ferramenta, a escassez de dados de monitoramento no Brasil ainda é muito ampla, e na Amazônia não é diferente, os que existem em muitos casos contém pouca série histórica e falhas, tornando assim a modelagem trabalhosa e onerosa.

Os resultados da aplicação do modelo SWAT mostraram-se satisfatórios, apresentando altos valores de consistência de correlação dos processos simulados, os valores de R^2 da precipitação simulada e observada foram de 0,78 e 0,87 para os anos de 2012 e 2013, respectivamente, resultado este que mostra uma boa sensibilidade à sazonalidade das chuvas na região tendo em vista que no ano de 2012 choveu 35% a mais que em 2013 (cerca de 128mm).

Os valores de vazão simulados dão conta de uma possível necessidade futura de simulação de vazão para determinados fins, como outorga de água, tendo em vista o alto grau de correlação, simular um processo como esse com um modelo torna-se extremamente econômico e prático, economizando na logística e no tempo gasto de deslocamento até o local. Os valores de R^2 para a vazão observada foram de 0,76 e 0,84, mas percebemos que em anos secos o modelo subestima a vazão e, e em ano de maior intensidade de chuva, o modelo superestima os valores de erro da vazão foram 1.13mm e 1.61mm para os anos de 2012 e 2013, respectivamente.

A simulação de cenários mostrou-se satisfatória levando em consideração os aspectos teóricos do modelo e dos processos hidrossedimentológicos. Esses resultados nos mostram que o modelo apresenta uma boa sensibilidade à alteração de uso e cobertura aplicada nos três cenários. Essa resultante foi evidenciada, nas variações dos índices de produção de sedimento, escoamento e vazão, apresentando características condizentes com as tipologias de cenários hipotéticos.

Como esperado no cenário 1 (floresta), os índices de produção de sedimento foram mínimos, tendo em vista os baixos valores de escoamento; quanto menor o escoamento, menor será a força **para** da água para depreender o material do solo para

que possa ser levado até o canal de drenagem, resultando assim em baixos valores de produção de sedimento.

O comportamento da resposta da simulação no cenário 2 (pastagem) nos mostra uma situação hipotética bem corriqueira nas bacias da região da área de estudo, tendo em vista que a pecuária tem sido já algum tempo uma das principais atividades executadas pelo homem nas áreas rurais, os valores de escoamento superficial deste cenários mostraram-se elevados devido a falta de vegetação, para interceptar e amortecer as gotas de chuva que caem na superfície, uma vez que essa vegetação não existe, o solo torna-se mais predisposto a desprendimento do material, sendo assim o solo desprotegido será muito mais propenso a produzir cargas sedimentares elevadas.

O resultado do cenário 3 (solo exposto) aponta que há um acúmulo de escoamento superficial resultando nos níveis de produção de sedimento, o modelo superestimou os valores de produção de sedimento no cenário 3 em 5 meses do ano (Fev, Mar, Out, Nov, Dez). Comparando com os gráficos de precipitação isso provavelmente pode ser explicado com os altos níveis de precipitação nesta época do ano que ocorrem justamente nos meses citados e assim reforçando nossa simulação hipotética de um suposto cenário.

O sistema agrosilvopastoril, ainda incipiente na bacia (com cerca de 0.9% da área) pode ser uma alternativa de uso para preservação e conservação do ambiente, mediante nossas análises as alterações abruptas de uso e cobertura causam aumento significativo na produção de sedimento da área em questão.

Nas áreas em que não houve a alteração da carga de sedimento a partir da mudança da cobertura, podemos inferir que os fatores que alteram esses índices são outros como, por exemplo, o relevo, pois comumente áreas planas (teoricamente) não seriam áreas de produção de sedimento, mas sim de deposição. Isso acontece na parte baixa da SBHMP próximo ao exutório, nessas áreas a produção de sedimento não ocorreu alteração na carga sedimentar.

O modelo SWAT, conforme já comentado, é um modelo conceitual que foi originalmente desenvolvido para prever o impacto do uso do solo na produção de água, sedimentos e produtos químicos em bacias agrícolas não instrumentadas.

Assim, com dados disponíveis sobre a área a ser avaliada pode-se aplicar esse modelo como uma ferramenta de avaliação quantitativa e qualitativa.

Dessa forma, a aplicação do modelo SWAT tem por objetivo apontar soluções, mesmo com restrições quantitativas (incertezas vinculadas à falta de comparações com

valores medidos) para o gerenciamento de bacias hidrográficas, possibilitando a orientação de órgãos de gestão ambiental na tomada de decisão em relação às práticas de uso do solo que são capazes de reduzir os impactos ambientais produzidos pela agricultura aos recursos hídricos.

BIBLIOGRAFIA

ARABI, Mazdak; FRANKENBERGER, J. R.; ENGEL, B. A.; ARNOLD, J. F. (2008). **Representation of agricultural conservation with SWAT**. Hydrological Processes. Vol. 22, 3042-3055 pp.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M **Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds**. Journal of Hydrology, London, v 176, n. 1, p. 57-77, 1966.

BALDISSERA, G.C. (2005). **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, 144 p.

BIGARELLA, J. J. **Estruturas e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: EdUFSC, 2003. p. 877-1436.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ABRH), 2000. p. 915-943.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

_____. IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Manual técnico de uso da terra**. Rio de Janeiro, 2006.

CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. **Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento**. Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p200-225.

CÂMARA, C. D. **Critérios e indicadores para o monitoramento hidrológico de florestas plantadas**. São Carlos, 2004. Tese (Doutor em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CAVALCANTE, M.M. **Transformações Territoriais no Alto Rio Madeira: Hidrelétricas, Tecnificação e (Re)organização**. 125 f. (Dissertação de Mestrado), Porto Velho: Universidade Federal de Rondônia, programa de pós-graduação em geografia - PPGG, 2008.

CHANG, M. **Forest Hydrology: an introduction to water and forests**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 373p.

CHORLEY, R. J. **Geomorphology and general systems theory**. USGS, Professional paper 500 B, 1962. (tradução em Notícia Geomorfológica, v. 22, n. 23, 1971. p. 3-22)

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. (2010). **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model**. Hydrological Process, vol 24, pp 1133-1148.

CPRM. **Geologia e recursos minerais do Estado de Rondônia: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado de Rondônia** – Porto Velho: CPRM, 2007. 153p.

CRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia**. São Paulo 1979. 106 p.

_____. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1980. 188 p.

_____. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, v.1. 1981. 149p.

_____. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

CUNHA, S. B. *et. al.* – **A questão ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 248p.

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. **Hydrological modeling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India**. Hydrological Processes, Malden, v. 23, p. 2394-2406, 2009.

EMMETT, W.W. 1970. **The hydraulics of overland flow on hillslopes**. Washington: U.S. Govt. Print. Off. 68 p. (Geological Survey Professional Paper 662-A).

FAHEY, B.; JACKSON, R. Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v.84, p.69-82, 1997.

FIRMINO, R. G.; FONSECA, M. B. **Uma discussão sobre os impactos ambientais causados pela expansão da agricultura: A produção de biocombustíveis no Brasil**. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUIÇÃO E ENERGIA NO MEIO RURAL 2008, Fortaleza. Anais...AGRENER GD, 2008.

FOSTER, I.D.L. 1995. Lake and reservoir bottom sediments as a source of soil erosion and sediment transport data in the UK. In: FOSTER, I.D.L.; GURNELL, A.M.; WEBB, B.W. (Ed.). **Sediment and water quality in river catchments**. Chichester: Wiley. p. 265-283.

FOSTER, G.R. 1971. The overland flow processes under natural conditions. In: INTERNATIONAL SEMINAR FOR HYDROLOGICAL PROFESSORS, 3., 1971, West Lafayette. **Biological effects in the hydrological cycle: proceedings**. West Lafayette: Purdue University. p. 173-185.

FREITAS, A. J. Gestão de Recursos Hídricos. In: SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.

GARBOSSA, L.H.P.; *et al.* 2011. **The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010.** 2011 Internationla SWAT Conference. Toledo, Espanha .2011.

GASSMAN, P. W. et al. **The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.** American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GOLDEFUM, J. A. Pequenas Bacias Hidrológicas: Conceitos Básicos (Capítulo 1): In: **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** PAIVA, J. B.D.de/ PAIVA, E. M. C. D.de (Organizadores). Porto Alegre, ABRH, 2003, 628p.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. (2005). **Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model.** *Hydrological Processes*. Vol. 19,.683–692 pp.

GUERRA & CUNHA **Degradação ambiental.** In: CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-339

GREEN, G. H.; GRIENSVEN, A. (2008). **Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds.** *Environmental Modelling and Software*. Vol. 23, 422-434 pp.

HAGGETT, P. e CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a nova geografia. In CHORLEY, R. J. e HAGGETT, P. (Ed.). **Modelos físicos e de informação em Geografia.** Rio de Janeiro: Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1975. p. 1 - 19.

HARVEY, D. **Explanation in Geography.** London 1975. 189 p.

HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K.G. In defense of experimental watersheds. **Water Resour. Res.**, v.5, n.1, p. 306-316, 1969.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. **Soil Science**, v.114, p.395-400, 1972.

HORTON, R. **The role of infiltration in the hydrological cycle.** *Trans. Am. Geophys*, v.14, 1933. p. 446 - 460

KNIGHTON, D. 1998. **Fluvial forms & processes: a new perspective.** Oxford: Oxford University. 383 p.

KRAMER, L.A.; MEYER, L.D. 1969. Small ammounts of surface mulch reduce soil erosion and runoff velocity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 12, p. 638-641.

LATUF, M. O. **Modelagem hidrológica aplicada ao planejamento dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Acre.** Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2011. (Tese de doutorado).

LARSON, W. E.; LINDSTROME, M. J. e CSHUMACHER, T. E. **The role of severe storms in soil erosion: a problem needing consideration.** Journal of Soil and Water Conservation, v.52, 1997. p. 90 - 95.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. (2002). **Comparison of two different approaches of sensitivity analysis.** Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 27, pp 645-654.

LIMA, J. S. **Modelagem de parâmetros morfométricos na Bacia Hidrográfica do Rio Mutum Paraná em ambiente SIG.** Porto Velho: UFRO/, 2012. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia UFRO).

LOPES, N.H.Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: subsídios a aplicação de praticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense.** 2008. 189 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARTINS, F.B. *et. al.*. **Zoneamento Ambiental da sub – bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS). Estudo de caso.** Cerne, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005.

MACHADO, P. J. O. **Uma proposta de zoneamento ambiental para a Bacia Hidrográfica da Represa de São Pedro – Juiz de Fora/MG.** Presidente Prudente: UNESP, 1998 (Dissertação de Mestrado).

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Piracicaba, 2002. Tese (Doutor em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MARCHIORO, Eberval (2008). **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 218p.

MELLOTT, L. E.; BERRY, M. W.; COMISKEY, E. J. e GROSS, L. J. **The design and implementation of an individual-based predator-prey model for a distributed computing environment.** Simulation Practice and Theory, v.7, 1999. p. 47-70.

MENDES, C. A. B. **Planejamento nacional dos recursos hídricos baseado no uso de técnicas de geoprocessamento.** www.iica.org.br. 1997.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E. **EUROSEM: DOCUMENTATION and user guide.** Silsoe, 1998.

MORAES, S. P.; MELO JUNIOR, H. R.; MATTOS, J. C. P.; SALIMON, C. I. **Avaliação das potencialidades hidrogeológicas e riscos de poluição hídrica no 2º distrito do município de Rio Branco-AC.** Cuiabá: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, 2007.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** London:Longman Group, 1986, 298 p.

MORO, Michele (2005). **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos.** Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, 100p.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos.** Rio de Janeiro: ABES, 1995. 200p.

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

NOVOTNY, V.;OLEM, H. **Water quality: Prevertion, Identification and management of diffuse pollution.** New York: Van Nostrand-Reinhold, 1993. 1054p.

KERTZMAN, F. F.; GOUVEIA, M. I. F.; MANO, V. G. T. **Orientações para combater a erosão no Estado de São Paulo.** São Paulo: IPT/DAEE, 1991. v. 1, 102p.

OKI, V. K. **Impactos da colheita de *Pinus taeda* sobre o balanço hídrico, qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias.** Piracicaba, 2002. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, **Avaliação do albedo em diferentes tipos de uso e cobertura da terra no sudoeste da Amazônia** (Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE)

REID, I.; BARTHURST, J. C.; CARLING, P. A.; WALLING, D. E.; WEBB, B. Sediment Erosion, Transport and Deposition. In: THORNE, C. R.; HEY, R. D.; NEWSON, M. D. **Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management.** New York: John Wiley & Sons, 1997. p. 95-135.

RENÓ, Camilo Daleles., SOARES, João Vivanei. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental.** Relatório Técnico Parcial, INEP, 2000.

ROCHA, J.S.M. & KURTZ, S.M.J.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas.** 4. ed. Santa Maria: Edições UFSM, CCR/UFSM, 2001. 302 p.

RODDA, J.C. Basin studies. In: RODDA, J.C. (ed.) **Facets of hydrology,** London: John-Wiley & Sons, 1976. p.257-297.

RONDÔNIA, **Plano Agroflorestal de Rondônia – PLANAFLORO.** Porto Velho: TECNOSSOLOS, Relatório Técnico, 2001.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. Sao Paulo: Oficina de Textos, 2004.184p.

SETTI, A. A. Legislação para o uso dos recursos hídricos. In: SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. **EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1. Model documentation**. Washington: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 145p. (Technical Bulletin, 1798)

SHEN, Z. Y.; GONG, Y. W.; LI, Y. H.; HONG, Q.; XU, L. LIU, R. M. (2009). **A Comparison of Wepp and Swat for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area**. Agricultural Water Management. Vol. 96, pp 1435 – 1442.

SILVA, A. M da;SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. de. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos; Rima, 2003. 320p.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, 1995. p.

SILVA, A. M. da; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. de. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 320 p.

SILVA, D. D. e RAMOS, M. M. **Curso de especialização por tutoria a distância: uso racional dos recursos naturais e seus reflexos no meio ambiente – Módulo 10. Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos**. Brasília: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, DEA, 2001. 89 p.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. (2009). **O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro**. Anais do Congresso XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

TOEBES, C. & OURYVAEV, V. **Representative and experimental basins, an international guide for research and practice**. Paris: UNESCO, 1970. 348 p.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia/ ciência e aplicação**, 2º ed, 2ºreimpr. ed. Universidade / UFRGS ABRH, Porto Alegre, 2001, 943 p.

_____. 4ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009.

_____. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre/RS v.1. 2005.

UZEIKA, Talita (2009). **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia**

hidrográfica rural. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental Hydrology.** 2ed. Boca Raton: CRC/Lewis, 2004. 475p.

WHITEHEAD, P.G. & ROBINSON, M. **Experimental basin studies – an international and historical perspective of forest impacts.** J. Hydrol., v.145, n.3-4, p. 217-230, 1993.