



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG



RAFAEL ADRIANO DE CASTRO

**MUDANÇA DO USO DA TERRA E OS SEUS EFEITOS NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA RURAL**

GUARAPUAVA/PR, 2016
RAFAEL ADRIANO DE CASTRO

**MUDANÇA DO USO DA TERRA E OS SEUS EFEITOS NOS PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA RURAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Geografia (Área de Concentração: Dinâmica Da Paisagem, Geomorfologia e Análise Ambiental)

Orientador: Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz

GUARAPUAVA, 2016

Catálogo na Publicação
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

C355m Castro, Rafael Adriano de
Mudança do uso da terra e os seus efeitos nos processos
hidrossedimentológicos em uma bacia rural / Rafael Adriano de Castro. --
Guarapuava, 2016
xiv, 101 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, área de concentração em
Análise da Paisagem, Geomorfologia e Análise Ambiental, 2015

Orientador: Edivaldo Lopes Thomaz

Banca examinadora: José Edézio da Cunha, Valdemir Antonel

Bibliografia

1. Geografia. 2. Uso da terra. 3. Modelagem. 4. SWAT. I. Título. II.
Programa de Pós-Graduação em Geografia.

CDD 551.48



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGG



TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL ADRIANO DE CASTRO

**Mudança do Uso da Terra e Seus Efeitos nos Processos
Hidrossedimentológicos em Uma Bacia Rural**

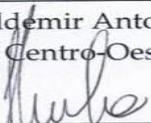
Dissertação **APROVADA** em 1/03/2016 como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geografia, na área de concentração Dinâmica da Paisagem e dos Espaços Rurais e Urbanos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), pela seguinte banca examinadora:



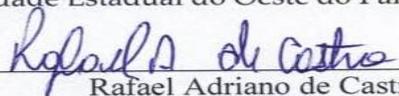
Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz – presidente
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)



Prof. Dr. Valdemir Antoneli
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)



Prof. Dr. José Edézio da Cunha
Universidade Estadual do Oeste do Parana (UNIOESTE)



Rafael Adriano de Castro

Guarapuava (PR), 01 de março de 2016.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
em especial pela dedicação e apoio
em todos os momentos difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me ensinarem o valor e a importância do estudo e da instrução para a minha vida.

Ao meu orientador Dr. Edivaldo Lopes Thomaz pelos ensinamentos ao longo deste período de convivência e pelas horas dedicadas à elaboração da dissertação.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste Mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Ao povo paranaense que através da estrutura existente na Universidade Estadual do Centro-Oeste, no departamentos de Geografia, me proporcionou a experiência de cursar o programa de Pós-Graduação.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e parceria.

E, finalmente, agradeço à força superior que me fez superar obstáculos e dificuldades e concluir com êxito este mestrado.

RESUMO

MUDANÇA DO USO DA TERRA E OS SEUS EFEITOS NOS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM UMA BACIA RURAL

Mudanças no uso da terra muitas vezes potencializam a erosão hídrica acarretando perda de água, solo, nutriente e matéria orgânica, razão por que se avaliou na mudança do uso da terra e os seus efeitos nos processos hidrossedimentológicos na bacia Rio das Pedras, utilizando-se o software SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Dois cenários foram simulados. No primeiro, o uso da terra atual. No segundo cenário, o uso atual foi substituído por floresta nativa. As simulações dos dois cenários foram comparadas analisando a vazão e produção de sedimentos e escoamento superficial. Foi criado um banco de dados com os dados hidrológicos necessários para adequada aplicação do modelo na bacia. O modelo foi calibrado em relação à vazão média mensal observada da estação fluviométrica ETA - Guarapuava em um período de 5 anos (2004 a 2008) e depois validado com o período de 5 anos (2009 a 2013). Porém, antes de calibrar o modelo efetuou-se a análise de sensibilidade dos parâmetros em relação à vazão observada da bacia, utilizando software SWAT CUP. Após a calibração do modelo os resultados do Índice de Nash & Sutcliffe alterado (COE), do percentual de tendência (PBIAS), e o coeficiente de determinação (R^2) foram, respectivamente, 0,69, -0,5 e 0,7, indicando bom ajuste entre a vazão média mensal da bacia Rio das Pedras simulada pelo modelo SWAT em relação aos dados observados. O estudo evidenciou a influência do uso da terra nas variáveis hidrológicas. Dessa forma, ocorreu em média um aumento de 53,2 % no escoamento superficial, 12 vezes mais na produção média de sedimentos e na vazão média houve um acréscimo 14,9 % na comparação entre o cenário 1 para o cenário 2.

Palavras-chave: Uso da terra, modelagem, SWAT

ABSTRACT

LAND USE CHANGE AND ITS EFFECTS ON HYDROSEDIMENTOLOGICAL PROCESSES IN A RURAL BASIN

Changes in land use often leverage the erosion causing water loss, soil, nutrient and organic matter, which is why we evaluated the change of land use and its effects on hydro sedimentological processes in Rio das Pedras basin, using SWAT software (Soil and Water Assessment Tool). Two scenarios were simulated. At first, the use of the current ground. In the second scenario, the current use has been replaced by native forest. The two simulated scenarios were compared analyzing flow and sediment yield and runoff. A database with the hydrological data required for proper application of the model in the basin was created. The model was calibrated in relation to the average monthly flow observed the pluviometric station ETA - Guarapuava in a period of 5 years (2004-2008) and then validated with the 5-year period (2009-2013). However, before calibrating the model made up the parameter sensitivity analysis in relation to the flow observed in the basin, using SWAT CUP software. After model calibration results Nash Index & Sutcliffe changed (COE), the percentage trend (BIAS), and the coefficient of determination (R^2) were, respectively, 0.69, 0.5 and 0.7 indicating good fit between the monthly average flow of the Rio das Pedras basin simulated by SWAT model to the observed data. The study showed the influence of land use on hydrological variables. Thus, there was an average increase of 53.2% in the runoff, 12 times more on average sediment yield and the average flow there was a 14.9% increase when comparing scenario 1 to scenario 2.

Keywords: Land use, modeling, SWAT

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.2 Organização do Texto	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Balanço Hídrico.....	19
2.2 Processos Hidrossedimentológicos	22
2.3 Modelos Hidrossedimentológicos	24
2.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool);.....	26
2.5 Aplicações do modelo SWAT	27
2.6 Processo de Funcionamento do Modelo SWAT	30
2.6.1 Fator de Uso e Manejo da terra	32
2.6.2 Determinação da Produção de Sedimentos na Bacia	33
2.6.3 Escoamento Superficial.....	34
2.6.3.1 Grupos Hidrológicos dos Solos.....	36
2.6.4 Propagação no curso d'água.....	37
2.6.4.1 Propagação da vazão líquida no curso d'água.....	37
2.6.4.2 Propagação da vazão sólida no curso d'água	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Caracterização da Área de Estudo.....	38
3.1.1 Clima	39
3.1.2 Uso da terra e rede drenagem	40
3.1.3 Relevo	45
3.1.4 Solos.....	47
3.2 Dados Climáticos e Fluviométricos	49
3.3 Sub-divisões da Bacia Rio das Pedras e as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)	52
3.4 Simulação de Cenários	56
3.5 Análise de sensibilidade	56

3.6 Calibração e Validação.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 Análise de Sensibilidade e Calibração	62
4.2 Simulação do Cenários.....	64
4.2.1 Balanço Hídrico	64
4.2.2 Simulação do volume de escoamento superficial.....	66
4.2.3 Simulação da vazões (Cenário 1).....	69
4.2.4 Simulação da vazões (Cenário 2).....	72
4.2.5 Produção de Sedimentos (Cenário 1).....	73
4.2.6 Produção de Sedimentos (Cenário 2).....	77
5 CONCLUSÕES.....	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
7 APÊNDICE - Caracterização e equacionamento fase terrestre do SWAT	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DO CICLO HIDROLÓGICO. (ADAPTADO, TUNDISI, 2003).....	19
FIGURA 2 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO SIMULADOS PELO SWAT (MODIFICADO DE NEITSCH ET AL., 2005).	21
FIGURA 3 - PROCESSOS ATUANTES NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	23
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DO MODELO SWAT (MODIFICADO DE KING ET AL. 1996)	31
FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO DAS PEDRAS.....	39
FIGURA 6 – MAPA DE USO DA TERRA E HIDROGRAFIA DA BACIA DO RIO PEDRAS EM 2013.	43
FIGURA 7 - MAPA DE DECLIVIDADE DA BACIA DO RIO DAS PEDRAS.	46
FIGURA 8 - MAPA DE TIPOS DE SOLOS DA BACIA DO RIO DAS PEDRAS.....	48
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES (PLUVIOMÉTRICAS, CLIMATOLÓGICAS E FLUVIOMÉTRICAS.	51
FIGURA 10 - PLANOS CARTOGRÁFICOS PARA GERAR AS HRUS	52
FIGURA 11 – SUB-BACIAS DO RIO DAS PEDRAS.	54
FIGURA 12 – SÉRIE DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO, VAZÃO SIMULADOS E OBSERVADOS E OS RESPECTIVOS PERÍODOS UTILIZADOS PARA AS ETAPAS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA PELO MODELO SWAT.	59
FIGURA 13 - RANKING DOS PARÂMETROS OBTIDO COM A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SWAT.....	62
FIGURA 14 - BALANÇO HÍDRICO (CENÁRIO 1) SIMULADO PELO SWAT PARA O PERÍODO DE 2009 A 2013.	65
FIGURA 15 - BALANÇO HÍDRICO (CENÁRIO 2) SIMULADO PELO SWAT PARA O PERÍODO DE 2009 A 2013.	66
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (MM) GERADO AO LONGO DA BACIA DURANTE O PERÍODO DE SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O CENÁRIO 1.	68
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (MM) GERADO AO LONGO DA BACIA DURANTE O PERÍODO DE SIMULAÇÃO, CONSIDERANDO O CENÁRIO 2.	68
FIGURA 18 - HIDROGRAMA COMPARATIVO COM VAZÃO OBSERVADAS E SIMULADAS.	69
FIGURA 19 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE A MÉDIA MENSAL DA VAZÃO SIMULADA E A MÉDIA MENSAL DA VAZÃO OBSERVADA.	70
FIGURA 20 - VAZÃO MENSAL (OBSERVADA E SIMULADA) X PRECIPITAÇÃO.....	71
FIGURA 21 – HIDROGRAMA COMPARATIVO COM VAZÃO OBSERVADAS E SIMULADAS.....	72
FIGURA 22 - PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (CENÁRIO 1).....	74
FIGURA 23 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE APORTE DE SEDIMENTOS E PRECIPITAÇÃO.	75
FIGURA 24 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO ENTRE A MÉDIA MENSAL DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS SIMULADA, E A MÉDIA MENSAL DA PRECIPITAÇÃO (MM).....	76
FIGURA 25 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE APORTE DE SEDIMENTOS E PRECIPITAÇÃO.	78
FIGURA 26 - PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS (CENÁRIO 2).....	79
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DA DEMANDA DE EVAPORAÇÃO DO SOLO DE ACORDO COM PROFUNDIDADE.....	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DOS NÚMEROS CN DA CURVA DE RUNOFF PARA BACIAS RURAIS	35
TABELA 2 - ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICA.....	49
TABELA 3 - DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS UTILIZADOS PELO WXGEN.	49
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS.....	55
TABELA 5 - EQUAÇÕES.....	60
TABELA 6 - RESULTADO FINAL DA ESTATÍSTICA DE VERIFICAÇÃO	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS DIFERENTES USOS E OCUPAÇÃO DA TERRA.	40
QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO DA DENSIDADE DE DRENAGEM (DD).....	44
QUADRO 3 – CLASSES DE DECLIVIDADE	45
QUADRO 4 - PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE MAIOR SENSIBILIDADE, LIMITES INFERIOR (LI) E SUPERIOR (LS) DO PARÂMETRO.	57
QUADRO 5 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIAS	60

LISTA DE ABREVIATURAS

AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution Model
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
ANA	Agência Nacional de Águas
ANSWERS	Areal Non-point Source Watershed Environment Response
ARS/USDA	Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture
BIOMIX	Eficiência do revolvimento biológico
BLAI	Índice do potencial máximo de área foliar
CANMX	Armazenamento máximo de água do dossel
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning
CN	Número da curva do SCS
CN2	Curva-número na condição umidade média do solo
COE	Coefficiente de Nash e Sutcliffe
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária
EPCO	Fator de compensação de água pelas plantas
ESCO	Fator de compensação de evaporação de água do solo
GLUE	Generalised Likelihood Uncertainty Estimation
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea
GW_REVAP	Coefficiente de água subterrânea
GWQMN	Limite entre a profundidade da água, no aquífero raso e a superfície
HRU	Hydrologic Response Units
PBIAS	Percentual de tendência
PI	Plano de Informação
RCHRG_DP	Fração de água percolada, β_{deep} , para o aquífero profundo
SFTMP	Temperatura de queda de neve
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMFMN	Fator de derretimento de neve no dia 21 de dezembro
SMFMX	Fator de derretimento de neve no dia 21 de junho
SMTMP	Temperatura base de derretimento de neve
SOL_ALB	Albedo do solo úmido

SOL_AWC	Capacidade de água disponível (mm H ₂ O / mm solo)
SOL_BD	Densidade aparente do solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
SOL_Z	Profundidade do solo (mm)
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TIMP	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve
TLAPS	Taxa de lapso da temperatura
TOPMODEL	Modelo de produção de escoamento baseado fisicamente
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Universal Soil Loss Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project
SCS	SCS Soil Conservation Service

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento dos efeitos da variação no uso da terra sobre o movimento de sedimentos e água através da bacia hidrográfica é muito importante para a tomada de decisões sobre o manejo de uso da terra.

Assim, torna-se importante a introdução de ferramentas (modelos) capazes de simular os processos que envolvem essa complexa relação entre o uso da terra e o manejo dos solos e as alterações negativas ou positivas que possam ocorrer nos processos hidrogeomorfológicos.

A principal vantagem da aplicação de modelos reside na possibilidade do estudo de vários cenários e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada ao seu baixo custo.

Através da modelagem, é possível criar cenários atuais ou futuros, onde modificações de clima, uso e manejo da terra podem ser alteradas para se estudar as respostas causadas à hidrologia, ao solo e à qualidade da água.

Porém, ainda que os modelos sejam ferramentas desejáveis, existe um longo trabalho a ser realizado antes que se possa lançar mão dessa importante ferramenta de planejamento. A falta de dados necessários para alimentar os modelos e, especialmente, a ausência de dados hidrossedimentológicos que permitam a sua validação são, possivelmente, os maiores fatores de restrição ao uso dessas ferramentas no Brasil.

Dentre os inúmeros modelos que vem sendo utilizados para o planejamento de bacias rurais, destaca-se o modelo o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático que permite simular diferentes processos físicos na bacia hidrográfica (Evaporação, Infiltração, Escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo), com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso da terra sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água, em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Utilizando o SWAT pode-se calcular hidrogramas e sedimentogramas bem como obter informações espaciais com possível simulação de cenários.

Para essa pesquisa foi escolhida a bacia do Rio das Pedras que apresenta características geomorfológicas, hidrossedimentológicas e de ocupação do solo representativas na região, e por ser a bacia hidrográfica que abastece de água a cidade de Guarapuava-PR.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar os processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio das Pedras, por meio do modelo hidrológico SWAT, sendo observados dois cenários, o primeiro considerou o uso da terra atual e o segundo considerou-se que a bacia ocupada em 100% por floresta nativa.

O modelo foi calibrado em relação à vazão média mensal observada da estação fluviométrica ETA - Guarapuava em um período de 5 anos (2004 a 2008) e depois validado com o período de 5 anos (2009 a 2013). Porém, antes de calibrar o modelo efetuou-se a análise de sensibilidade dos parâmetros em relação à vazão observada da bacia, utilizando software SWAT CUP. Após a calibração do modelo os resultados do Índice de Nash e Sutcliffe alterado (COE), do percentual de tendência (PBIAS), e o coeficiente de determinação (R^2) foram, respectivamente, 0,69, -0,5 e 0,7, indicando bom ajuste entre a vazão média mensal da bacia na Bacia Rio das Pedras simulada pelo modelo SWAT em relação aos dados observados. Esses resultados indicam que o modelo SWAT simulou, de forma satisfatória, as vazões médias mensais da bacia, após um período de calibração.

O trabalho teve o objetivo principal avaliar à mudança do uso da terra e os seus efeitos nos processos hidrogemomorfológicos em bacia rural.

Os objetivos podem ser explicitados mais especificamente da seguinte forma:

- Avaliar o escoamento superficial, vazão e produção de sedimentos na bacia do Rio das Pedras (Guarapuava, PR), por meio do modelo SWAT
- Correlacionar dois cenário uso da terra;

Cenário 1: Uso da terra atual.

Cenário 2: A bacia ocupada em 100% da área por floresta nativa.

Assim podendo analisar os efeitos desses diferentes usos nos processos hidrogemomorfológicos.

1.2 Organização do Texto

Este texto apresenta-se distribuído em 4 capítulos, divididos e dispostos de forma a torná-lo mais objetivo e conciso.

A revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 1, contendo uma descrição do balanço hídrico, Processos hidrossedimentológicos, Modelos hidrossedimentológicos, utilização do modelo SWAT e aplicações do modelo SWAT

O Capítulo 2 traz o processo de funcionamento do modelo SWAT, caracterização da área de estudo, descreve os aspectos físicos da bacia do Rio das Pedras. Ainda nesse capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros climatológicos e físicos do solo, além da sua aplicabilidade em cenários.

No Capítulo 3, são vistos os resultados e discussão da aplicabilidade do modelo SWAT utilizado para avaliar e prognosticar o escoamento superficial, a vazão líquida, o aporte e a produção de sedimentos na bacia do Rio das Pedras.

Por fim o Capítulo 4 é dedicado às conclusões da pesquisa realizada e algumas sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na literatura, alguns temas importantes têm sido observados para justificar a aplicação de modelos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas. Neste capítulo, são discutidos alguns aspectos relevantes da literatura sobre o, balanço hídrico, grupos hidrológicos dos solos, processos hidrossedimentológicos, modelos hidrossedimentológicos e a utilização do modelo SWAT. Todos esses aspectos ajudam a compreender onde o presente trabalho se insere e quais os potenciais de aplicações do modelo. As principais equações da fase terrestre do SWAT estão descritas no Apêndice.

2.1 Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico é o foco central da hidrologia e abrange a circulação de água na atmosfera, no interior e na superfície dos solos e rochas, nos oceanos e nos seres vivos (Figura 1).

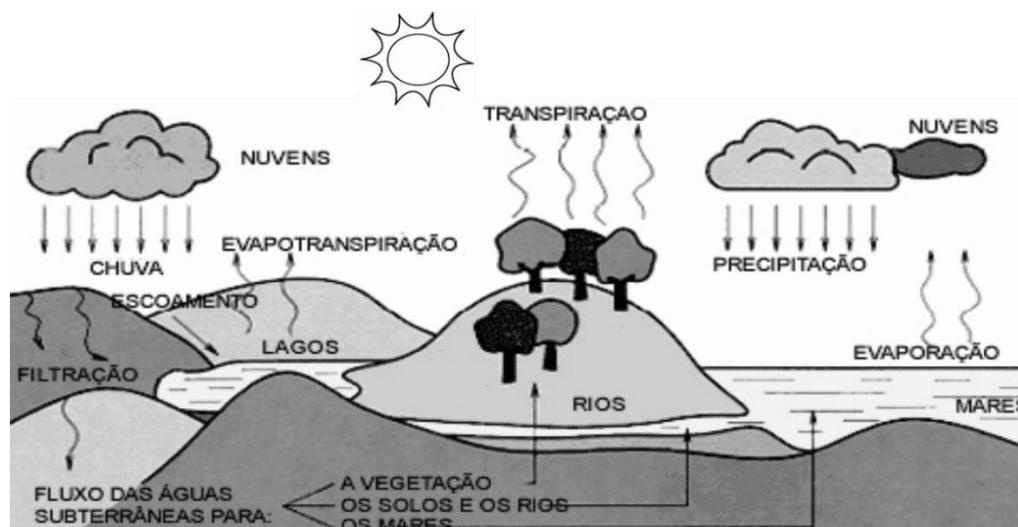


Figura 1 - Representação do Ciclo Hidrológico. (Adaptado, TUNDISI, 2003)

A movimentação da água se dá principalmente pela entrada contínua de radiação solar no sistema terrestre. Essa energia faz com que a água evapore, seja transportada pelo vento, condense e precipite (TUNDISI, 2003). Após a chuva, ela pode ser interceptada pela vegetação, evaporar ou permanecer na bacia. Neste último caso, a água segue para terrenos

mais baixos por ação da gravidade. Em terrenos impermeáveis, escoam pela superfície até encontrar lagos, rios e, posteriormente, desembocar nos oceanos. Já em terrenos permeáveis, a água infiltra-se pelo solo, até chegar aos canais ou aos reservatórios chamados lençóis subterrâneos (TUCCI, 2001).

Dessa forma o balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água no solo (TUCCI, 1997), sendo resultante da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo (PEREIRA et al., 1997). O balanço hídrico é uma ferramenta utilizada em diversas áreas do conhecimento, tais como a agrícola, florestal e hidrológica. Dentro das atividades agrícolas, algumas práticas estão diretamente relacionadas com o balanço hídrico, como o manejo e mobilização do solo, irrigação, colheita, entre outros.

De acordo com Tucci (1997), o balanço hídrico de bacias hidrográficas geralmente visa estimar a evapotranspiração, baseando-se em dados de precipitação, evaporação e escoamento superficial e profundo.

As rotinas hidrológicas presentes no modelo SWAT incluem os processos na zona vadosa (infiltração, evaporação, consumo de água pelas plantas, escoamento sub-superficial e percolação) e o fluxo de água subterrânea (Figura 2). O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT segue a seguinte equação de balanço hídrico a ser realizada em cada Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units – HRU*):

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

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

SW_0 = conteúdo inicial de água no solo no dia i (mm);

t = tempo (dias);

R_i = precipitação no dia i (mm);

Q_i = escoamento superficial no dia i (mm);

ET_i = evapotranspiração no dia i (mm);

P_i = percolação da água na camada simulada para a camada inferior, mm (mm);

QR_i = quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento subsuperficial (fluxo de retorno) (mm).

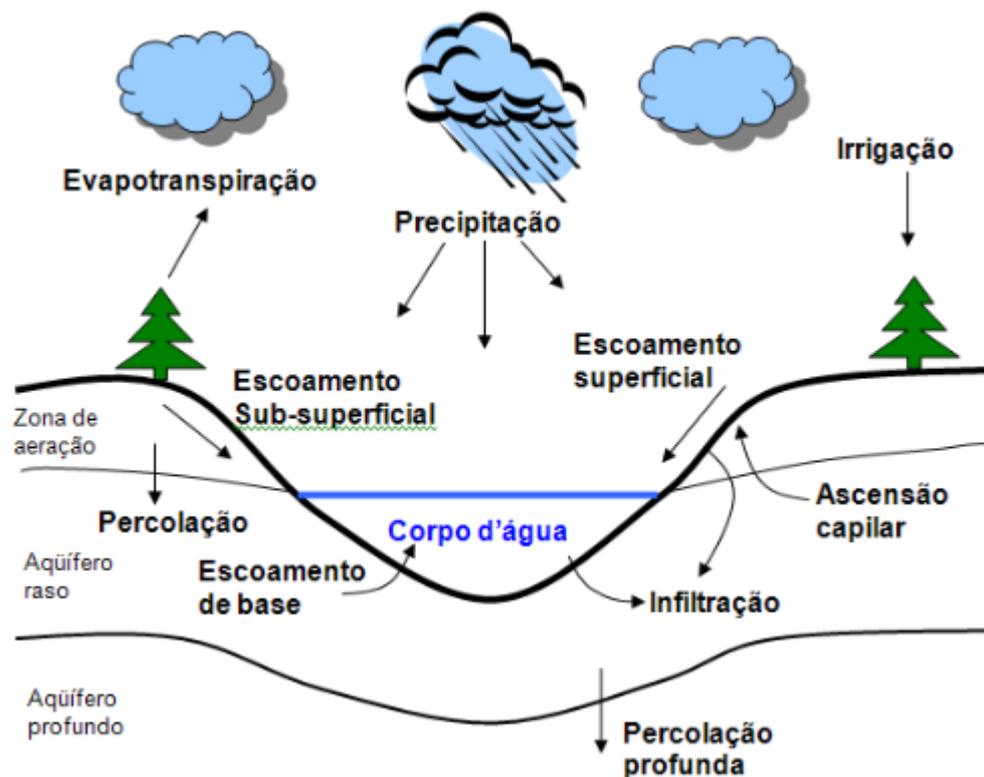


Figura 2 - Principais componentes do balanço hídrico simulados pelo SWAT (modificado de Neitsch et al., 2005).

O balanço hidrológico é, assim, calculado de forma independente para cada HRU e os resultados das HRU são somados para calcular os valores totais da sub-bacia. Cada HRU é caracterizada por duas fronteiras, uma superior correspondente à superfície do solo, e outra inferior correspondente ao aquífero profundo. A fronteira superior recebe água diretamente da precipitação, sendo que, parte desta se converte em escoamento superficial, uma parte infiltra-se e uma outra parte se evapora. A água que se infiltra no solo está sujeita a diversos fatores, podendo ser evapotranspirada, percolada para o aquífero mais profundo ou transportada lateralmente ao longo do perfil do solo.

Segundo Baldissera (2005), cada termo do balanço hídrico pode ser alterado por ações antrópicas, como o desmatamento, a mudança do uso e ocupação da terra e a construção de barragens, atingindo níveis locais e regionais. Conseqüentemente, qualquer atividade

humana que altere os fatores básicos que determinam o balanço hídrico acaba por influir na disponibilidade dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica.

2.2 Processos Hidrossedimentológicos

De acordo com Silva et al. (2003) os processos hidrossedimentológicos estão intimamente vinculados ao ciclo hidrológico e compreendem as etapas de deslocamento, transporte e deposição de partículas sólidas presentes na superfície da bacia hidrográfica.

O processo de deposição ocorre quando a força do escoamento se reduz até a condição de não poder continuar a deslocar a partícula. O depósito dos sedimentos geralmente se dá em locais relativamente mais baixos, podendo ocorrer em depressões naturais do terreno ou mesmo em encostas de declividade mais suave (CARVALHO 2008).

De acordo com o Walling (1983), a magnitude da taxa de entrega de sedimentos para uma determinada bacia é influenciada pela variação dos fatores geomorfológicos e ambientais, incluindo natureza, extensão e localização das fontes de sedimento, relevo e características do declive, padrão de drenagem e hidráulica dos canais, cobertura vegetal, uso da terra, textura e estrutura do solo.

Segundo Carvalho (2008), os sedimentos que chegam ao curso d'água apresentam diversas formas, tamanhos e pesos, sendo submetidos a um processo de transporte diferenciado, de acordo com as condições do local e do escoamento. De acordo com o autor, o transporte nos canais pode ocorrer de três maneiras:

- Carga sólida de arrasto – são as partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito praticamente todo o tempo.
- Carga sólida saltante – são as partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.
- Carga sólida em suspensão – são as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão.

As partículas de granulometria maior, como as areias e cascalhos, são roladas, deslizadas ou saltam ao longo do leito dos rios. Tal porcentagem também é descrita por

Carvalho (2008), ao considerar que a carga em suspensão é predominantemente maior que a do fundo no alto curso (90% a 95%).

Além das formas de transporte sólido apresentadas, existe uma parcela de material que é transportada dissolvida no curso d'água, movimentando-se na mesma velocidade do fluxo. A carga dissolvida compreende basicamente os constituintes intemperizados das rochas que são transportados em solução química pelas águas fluviais e subterrâneas.

A proporção entre os materiais dissolvidos e materiais particulados varia entre os diferentes cursos d'água. Christofolletti (1981) cita que, para os rios brasileiros, a carga particulada geralmente é bem maior que a carga dissolvida. Além disso, o autor discorre que a composição química das águas fluviais varia de acordo com a litologia, a vegetação e a utilização do solo da bacia hidrográfica.

O somatório das parcelas de sedimentos carregadas, corresponde à carga total de sedimentos transportada pelo curso d'água. A carga total de sedimentos é, em última análise, composta por materiais fornecidos tanto por processos químicos, por processos pluviais e por movimentos de arraste de massa nas vertentes. A Figura 3 ilustra os processos atuantes nesse sistema.

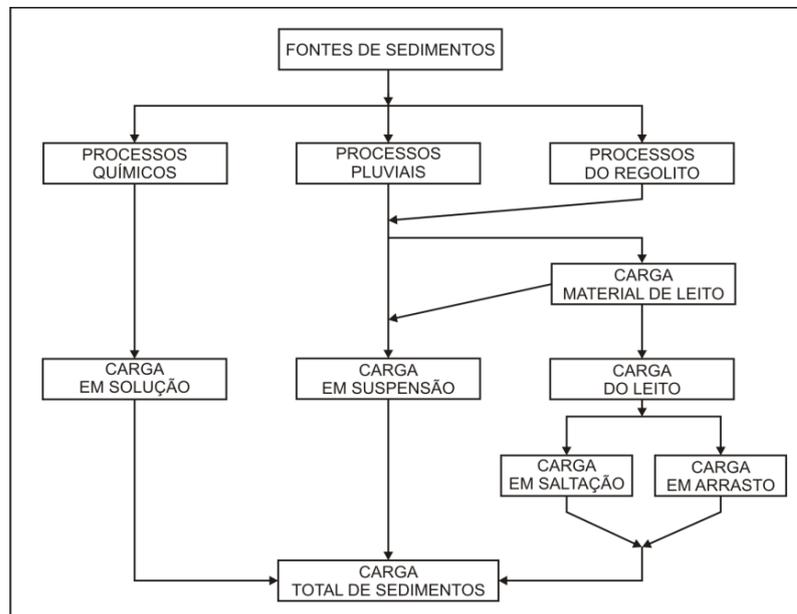


Figura 3 - Processos atuantes no transporte de sedimentos (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Segundo Silva et al. (2003), é importante ressaltar que a maior parte destas considerações citadas acima, é válida principalmente para bacias com pouco índice de degradação, pois se houver superexploração do solo e dos recursos hídricos de uma bacia, seu regime fluvial, bem como o regime hidrossedimentológico, podem apresentar-se completamente distorcidos em relação a seu regime natural.

2.3 Modelos Hidrossedimentológicos

De acordo Uzeika (2009) os modelos hidrossedimentológicos são ferramentas computacionais que se fundamentam em equações matemáticas para reproduzir os efeitos dos principais agentes ambientais (clima, solo, topografia e uso da terra) na estimativa dos componentes do processo erosivo (desagregação, deposição e transporte de sedimentos).

Os processos hidrossedimentológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica são extremamente complexos, não podendo ser inteiramente representados por um único modelo. Segundo Merritt et al. (2003), cada tipo de modelo serve para um propósito, sendo que nenhum modelo pode ser aplicado em todas as situações. Assim, a escolha do modelo deve ser feita considerando-se o objetivo específico a ser alcançado pela sua aplicação, sendo que alguns fatores afetam sua escolha:

- Dados requeridos pelo modelo, incluindo as variações temporais e espaciais dos dados de entrada e saída;
- Precisão e validade do modelo, considerando suas premissas básicas;
- Componentes do modelo que refletem sua capacidade;
- Objetivos do usuário do modelo, incluindo sua facilidade de uso, a escala e a forma dos dados de saída; e,
- Necessidade de capacidade computacional.

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), tipos de relações entre essas variáveis (empíricas ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (TUCCI, 2005).

Os modelos conceituais podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos, os semiconceituais estão relacionados às características do processo, embora mantenham razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto que os modelos físicos utilizam as equações para representar os processos (TUCCI, 2005).

Os modelos físicos são baseados em equações que, por exemplo, descrevem o fluxo de água e sedimentos em uma bacia, como as equações de conservação de massa e do momento (BENNETT, 1974). Isto é, os parâmetros podem ser estimados através de medidas reais.

Os modelos conceituais são baseados tipicamente na representação da bacia como uma série de armazenamentos internos. Geralmente incorporam na sua estrutura os mecanismos de transferência de sedimentos e de geração de escoamento, representando os caminhos de fluxo dentro da bacia como uma série de armazenamentos, cada qual exigindo uma caracterização da sua dinâmica. Eles tendem a incluir uma descrição geral dos processos da bacia sem, no entanto, incluir detalhes específicos das interações entre os processos que demandariam informações mais detalhadas (ANDERSON et al. 2006).

Os modelos para escala de bacia hidrográfica devem ser capazes de reproduzir o comportamento da água, sedimentos e poluentes, durante todos os processos que possam ocorrer dentro da bacia. Assim, de uma maneira geral, os modelos dividem os processos de simulação na bacia vertente e no canal fluvial (SINGH e WOOLHISER, 2002).

A fase de bacia engloba a transformação da precipitação em escoamento dentro da bacia; já na fase de canal, ocorre o cálculo da vazão de saída, sendo conhecidas ou arbitradas a vazão de entrada e as características do canal. Os processos sedimentológicos que ocorrem no canal aluvial são dois: agradação e degradação, sendo que estes são definidos basicamente em função da capacidade de transporte do escoamento, da carga a ser transportada e das condições de erodibilidade do canal (MERRITT et al., 2003).

Em resumo, alguns dos modelos são baseados em relações empíricas, apresentando algoritmos simplificados, e outros, por sua vez, utilizam equações de base física, com esquemas computacionais numéricos complexos.

Dentre os modelos que vêm sendo utilizados atualmente em estudos em bacias hidrográficas citam-se, WEPP, SWAT, ANSWERS, AGNPS, TOPMODEL, dentre outros. Nessa pesquisa foi utilizado o Modelo *Soil Water Assessment Tool* (SWAT), que é um modelo matemático, desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*.

O SAWT é um modelo de simulação contínua de longo período. Foi desenvolvido para auxiliar no planejamento voltado para a conservação do solo e da água. O modelo possui oito principais componentes: hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento da vegetação, nutrientes, pesticidas e práticas agrícolas. O escoamento superficial é estimado pelo método da Curva Número e a vazão de pico pelo método Racional Modificado (NEITSCH et al., 2005). A produção de sedimentos é determinada pela Equação Universal da Perda de Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS, 1975).

2.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool);

Segundo Neitsch et al. (2005) o SWAT é um modelo matemático que permite a manipulação de diferentes processos físicos e simulação de eventos erosivos em bacias hidrográficas, com o objetivo de dar suporte à análise dos impactos das alterações no uso da terra sobre o escoamento superficial e subterrâneo, das águas pluviais, produção de sedimentos e qualidade da água, em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Para satisfazer a estes objetivos o modelo é baseado nas características físicas da bacia, usa dados de entrada normalmente disponíveis, é computacionalmente suficiente para operar sobre bacias com > 1000 km² e é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (> 100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso da terra.

O modelo possui sete componentes de dados de entrada: dados de solo, dados climáticos, dados de uso da terra e crescimento vegetal, dados de fertilizantes, dados de pesticidas e toxinas, dados de preparo do solo, dados de áreas urbanas (ARNOLD et al., 1998).

Os dados de Solo são referentes ao número de camadas do solo, profundidade máxima da raiz no perfil do solo, porosidade, textura, profundidade das camadas, densidade, capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada, teores de carbono orgânico, porcentagem de argila, silte, areia e fragmentos de rochas, albedo e fator erodibilidade do solo.

Os dados Climáticos são a relação entre fatores climáticos, os dados de entrada do modelo dividem-se em dois tipos: diários e mensais. Os dados diários podem ser médias diárias ou somas diárias relacionados aos seguintes fatores: precipitação, temperatura do ar e umidade relativa do ar. Os dados mensais são médias (do respectivo mês) referentes a todos os anos simulados.

Segundo Arnold et al. (1998) também são solicitados à localização geográfica da estação, altitude, número de anos dos dados acumulados, média mensal das temperaturas máximas e mínimas diárias, desvio padrão para as temperaturas máximas e mínimas diárias de cada mês, média mensal da precipitação total, desvio padrão para a precipitação diária de cada mês, probabilidade de dias chuvosos seguidos de dias secos de cada mês, probabilidade de dias chuvosos seguidos de dias chuvosos de cada mês, média mensal de dias de precipitação, valor máximo de meia hora de chuva de cada mês, média de radiação solar diária de cada mês, média diária do ponto de orvalho de cada mês e média diária da velocidade do vento de cada mês.

Caso os dados climáticos diários não existam e necessitem ser simulados ou quando faltar algum dado, o SWAT utiliza o modelo gerador climático WXGEN¹, que exige somente dados mensais para gerar os dados diários representativos para simular o clima da região.

Já os dados de uso da terra e crescimento vegetal é relação entre a cobertura do solo e crescimento das plantas, assim como ao preparo do solo, geralmente opta-se por utilizar os dados do próprio modelo. Isso ocorre mais pela falta de informações a respeito do que por compatibilidade com as culturas locais e práticas de manejo com aquelas que constam no modelo.

2.5 Aplicações do modelo SWAT

Neste item serão apresentadas algumas aplicações do SWAT no Brasil e mundo envolvendo simulações de vazões, transporte de sedimentos.

Oliveira (1999) aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Joanes, na Bahia, com área de aproximadamente 755 km², para avaliar as alterações hidrossedimentológicas provocadas pelos diferentes usos da terra. O autor concluiu que a redução da vegetação nativa e o aumento da urbanização incrementaram as perdas de solo em aproximadamente 17% em 13 anos de simulações. Dessa forma, os resultados obtidos permitiram avaliar de forma quantitativa os efeitos da alteração no uso da terra devido à substituição da vegetação nativa por outras, bem como os efeitos da urbanização na bacia hidrográfica.

¹ O gerador climático WXGEN (Sharpley e Williams et al, 2003).

Spruill et al. (2000) utilizou o modelo SWAT em uma sub-bacia experimental com área de 5,5 km², localizada no centro de estudos da Universidade de Kentucky, nos EUA, com intuito de avaliar a aplicabilidade do modelo em reproduzir vazões diárias, num período de 2 anos de simulação. Ao analisarem os resultados obtidos pelo modelo, constaram que, devido ao rápido tempo de resposta da bacia, decorrente da área reduzida, o SWAT não apresentou resultados satisfatórios fornecendo um coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE)² que variou entre -0,04 a 0,19. Contudo estes mesmos autores também avaliaram o comportamento do modelo em reproduzir vazões médias mensais e encontraram valores de COE entre 0,58 e 0,89, em cada ano simulado. Desta forma puderam concluir que o modelo SWAT pode ser aplicado a pequenas bacias hidrográficas, porém, as análises comparativas mensais se mostram mais adequadas que as diárias.

Machado (2002) e Machado et al. (2003), utilizaram o modelo SWAT para simular cenários alternativos de uso da terra na sub-bacia do ribeirão Marins em Piracicaba (SP) obtendo uma redução na produção de sedimentos pela bacia de 10,8% no cenário 1, quando foram respeitadas as áreas de preservação permanente nas margens de rios e em lagoas e uma redução de 94% no aporte de sedimentos no cenário 2.

Quando a área de pastagem foi substituída por vegetação nativa, mostrando dessa forma a necessidade de se tratar a paisagem de uma bacia num aspecto global, identificando as áreas sensíveis, onde são necessárias práticas de controle dos processos erosivos.

Com intuito de avaliar o comportamento do modelo SWAT para simular o escoamento superficial em 3 sub-bacias do sudoeste de Oklahoma nos Estados Unidos, Liew e Garbrecht (2003) consideraram diferentes condições climáticas: normais, com deficiência e com excesso hídrico. Seus resultados mostraram que o modelo foi capaz de simular de forma adequada o escoamento superficial em apenas uma sub-bacia, sendo que, para as demais, foi necessário utilizar o processo de calibração para conseguir resultados satisfatórios nas condições de clima normal e com deficiência hídrica. Para as condições de excesso hídrico, o escoamento superficial foi simulado de forma inadequada.

² O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) indica o quanto os pontos do gráfico de eventos observados versus eventos simulados se aproximam de uma linha com inclinação 1:1. O COE pode variar a partir de negativo infinito a 1, sendo 1 indicativo de um perfeito ajuste.

No mesmo sentido, Govender e Everson (2005), avaliando o comportamento hidrológico de duas pequenas bacias na África do Sul, também encontraram em seus trabalhos melhores resultados com o SWAT para anos mais secos que anos úmidos. Um consenso entre os autores para explicar esses resultados é que o SWAT possui limitações para quantificar a água disponível no solo.

Moro (2005) utilizou o SWAT para avaliar a produção de sedimentos e o volume de escoamento superficial em uma sub-bacia na região de Piracicaba, SP. Os resultados encontrados mostram-se satisfatórios indicados pelo alto COE (0,90) na simulação do volume de escoamento superficial. Na produção de sedimentos o modelo também apresentou bons ajustes visto que o COE encontrado foi de 0,83, concluindo que o modelo SWAT é capaz de simular escoamento e sedimentos mesmo quando aplicados à pequenas bacias hidrográficas.

Baldissera (2005) aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, Mato Grosso, com intuito de simular as vazões médias mensais. A autora utilizou 5 postos fluviométricos instalados ao longo do rio Cuiabá para a calibração e validação do modelo e o período de 1994 a 1998 e 1999 a 2001 para calibração e validação respectivamente. Apesar do COE indicar valores abaixo de 0,5 na maioria dos postos de observação (3), a autora concluiu que em 2 postos o modelo foi adequado (COE=0,71) e que o modelo é uma ótima ferramenta de gestão dos recursos hídricos.

Mishra, Kar e Singh (2007) simularam a vazão e a quantidade de sedimentos através do SWAT na bacia denominada Banha, no distrito de Jharhhand, localizada no nordeste da Índia com a intenção de auxiliar as tomadas de decisão e conseqüentemente o planejamento de seus recursos hídricos. Tendo como base as sub-bacias e seus respectivos usos da terra, os autores compararam as variáveis chuva, vazão e sedimento entre si, através de análise de regressão, e concluíram que as bacias que possuem as maiores porcentagens de área com floresta nativa, apresentam vazões e carga de sedimentos menos variáveis, e assim, possuem melhor proteção contra a erosão.

Marchioro (2008) realizou uma simulação da vazão e da produção de sedimentos na bacia do córrego Santa Maria no noroeste Fluminense, RJ, com o modelo SWAT. Os resultados das simulações foram comparados com dados observados para a vazão durante o biênio 2006-2007, e para a concentração de sólidos em suspensão entre dezembro de 2006 a dezembro de 2007. O COE para a vazão mostrou satisfatório (COE=0,72), contudo para a

concentração de sólidos em suspensão o COE variou entre -6,11 a 0,02, na calibração e validação respectivamente. O fato do alto grau de disparidade entre valores observados e simulados na concentração de sólidos foi atribuído pelo autor pela falta de uma série contínua de dados observados para melhor calibração.

O modelo SWAT foi aplicado por Uzeika (2009) em uma bacia hidrográfica rural no município de Arvorezinha, RS, com objetivo de avaliar a produção de sedimentos sob 3 condições de uso e manejo da terra. Os resultados mostraram não haver diferença no volume de escoamento superficial entre os cenários adotados e uma redução de até 30 % do aporte de sedimentos, quando o cenário foi o cultivo mínimo, comparando com o sistema convencional.

2.6 Processo de Funcionamento do Modelo SWAT

O SWAT é um modelo hidrossedimentológico que opera em escala de bacia, geralmente aplicado em simulações contínuas no tempo, e também pode ser utilizado na obtenção de dados diários e sub-diários. Dessa forma, as informações necessárias para alimentar o modelo devem ser referentes à bacia estudada e os dados tabulares de entrada devem apresentar o intervalo de tempo que se deseja obter nos resultados.

Os dados de entrada (planos de informação cartográficos – PI's e dados tabulares) são inseridos através de uma interface apropriada. Os PI's necessários são: o Modelo Numérico do Terreno (MNT); solos, uso e manejo da terra e delimitação da bacia hidrográfica.

A interface desenvolvida entre o SWAT e o SIG ArcGis, além de facilitar entrada de dados no modelo, subdivide automaticamente a bacia em sub-bacias a partir do MNT, e então relaciona os dados de entrada a cada sub-bacia. Essa interface ainda possibilita que os dados de saída do modelo sejam exibidos utilizando-se de mapas, gráficos e tabelas do ArcGis. A Figura 4 representa sinteticamente os processos representados pelo modelo SWAT.

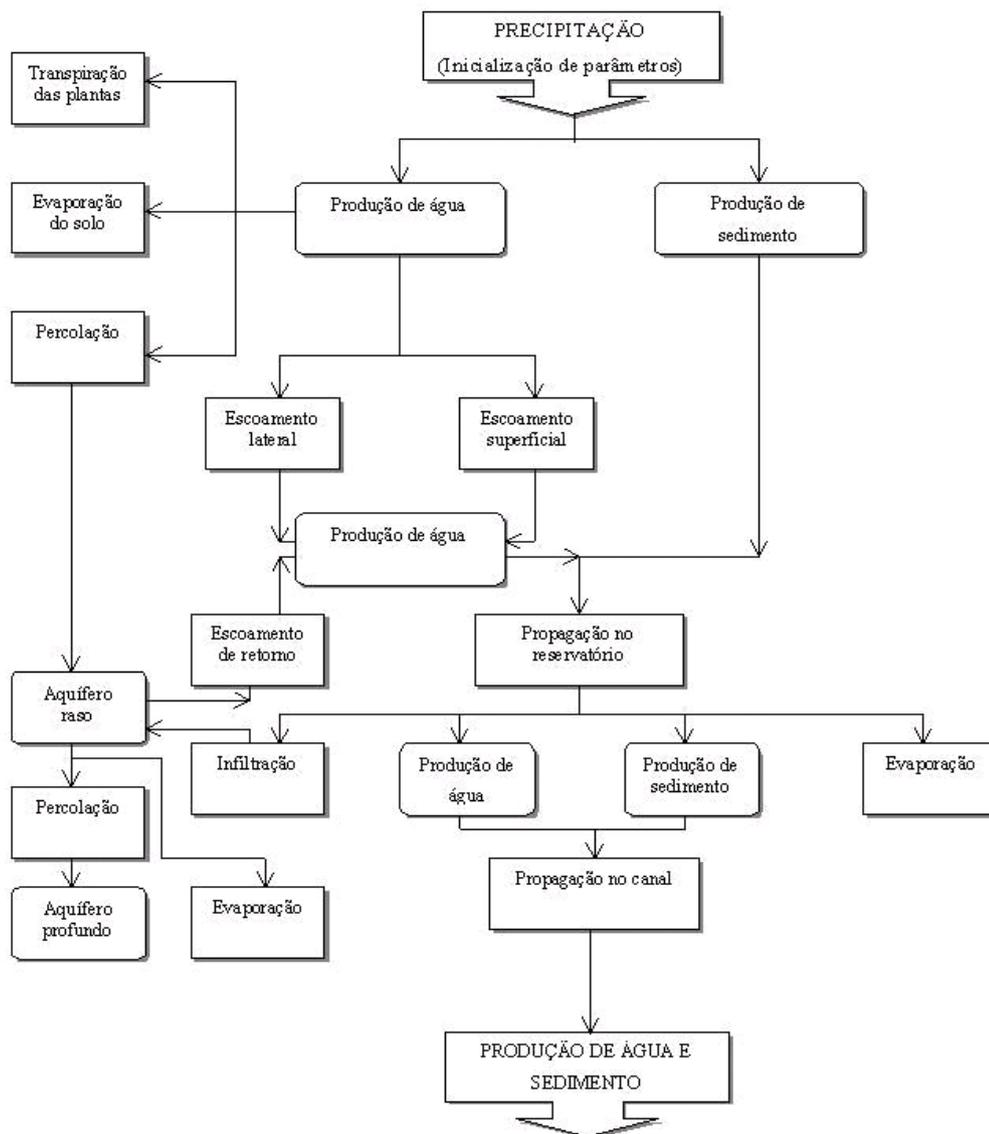


Figura 4 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT (modificado de King et al. 1996)

A precipitação é o início do ciclo hidrológico para o modelo SWAT, sendo um dos principais dados de entrada no modelo. Dessa maneira, todos os resultados de balanço hidrológico, 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).

Quando o escoamento superficial, juntamente com os sedimentos transportados, alcançam a rede de drenagem, inicia-se a fase de canal 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 então 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 produção de sedimentos dentro da calha do rio é regida pelos processos de agradação e deposição, ambos controlados pela força da água. Estes processos são definidos basicamente em função da capacidade de transporte do escoamento, da carga a ser transportada e das condições de erodibilidade do canal (NEITSCH et al., 2005).

Segundo Neitsch et al., 2005, a degradação do canal poderá ser significativa em bacias sujeitas a eventos extremos de precipitação e em bacias onde haja processos de mudança de uso da terra em curso, como desmatamento ou urbanização. O mesmo manual ainda sugere que, pela dificuldade de se mensurar em campo a degradação/ deposição do canal, o usuário deve ajustar as cargas de sedimento das sub-bacias até que pareçam razoáveis e, em seguida, assumir que a diferença restante entre real e observado é devido ao canal.

2.6.1 Fator de Uso e Manejo da terra

O fator de uso e manejo da terra 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 da terra através da seguinte equação:

$$C_{USLE} = \exp([\ln(0,8) - \ln(C_{USLE})] \exp[-0,00115 \cdot \text{rsd}_{\text{surf}}] + \ln[C_{USLE, \text{nm}}]) \quad (2)$$

onde, $C_{USLE,nm}$ 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 da terra pode ser estimado a partir da seguinte equação (Arnold e Williams, 1995):

$$C_{USLE,nm} = 1,463\ln[C_{USLE,aa}] + 0,1034 \quad (3)$$

sendo $C_{USLE,aa}$, a média anual do fator C da cobertura vegetal considerada.

2.6.2 Determinação da Produção de Sedimentos na Bacia

Para a determinação da produção de sedimentos na bacia o modelo SWAT utiliza Equação Universal de Perdas de Solo Modificada – MUSLE (Williams, 1975). Na MUSLE, o fator energia da chuva é substituído pelo fator de escoamento superficial. A estimativa da produção de sedimentos é permitida porque o escoamento superficial é uma função das condições de umidade antecedente e este fator representa a energia utilizada pela desagregação e transporte de sedimentos. A produção de sedimentos (M) é medida em toneladas por unidade de área para cada evento, sendo dada pela Equação 2:

$$M = a(Q_s \times qp)^b K \times Ls \times C \times P \quad (4)$$

em que M = produção de sedimentos (t/ha); a e b = são coeficientes de ajuste (adimensional); Q_s = volume escoado total (m^3); qp = vazão de pico do evento (m^3/s); K = fator de erodibilidade do solo que varia de acordo com os tipos de solos ($t \cdot ha \cdot h/ha/MJ/mm$); LS = fator topográfico, isto é, o conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade (adimensional); C = fator do uso e ocupação da terra (adimensional), sendo a relação dos diferentes tipos de manejo da terra e a intensidade das perdas de solo; e P = fator prática conservacionista do solo onde é a relação entre determinada prática conservacionista e as perdas de solo (adimensional).

2.6.3 Escoamento Superficial

Escoamento superficial ocorre sempre que a taxa de incidência de água à superfície do solo excede a taxa de infiltração. Quando a água inicialmente incide em um solo seco, a taxa de incidência e as taxas de infiltração podem ser semelhantes. No entanto, a taxa de infiltração diminuirá à medida que o solo se torna mais úmido. Quando a taxa de incidência é maior do que a taxa de infiltração, as depressões da superfície começam a preencher e, se a taxa de incidência continuar a ser superior à taxa de infiltração de uma vez, quando todas as depressões da superfície tiverem sido preenchidas, o escoamento superficial começará (NEITSCH et al., 2005).

A equação de escoamento superficial Método SCS (*Soil Conservation Service*) de Curva de Número é um modelo empírico que entrou em uso comum na década de 1950. Foi o produto de mais de 20 anos de estudos envolvendo relações chuva-vazão de pequenas bacias hidrográficas rurais em todos os EUA. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma base consistente para estimar a quantidade de escoamento sob diferentes condições de uso da terra e tipos de solo.

A equação de escoamento do Método (CN) de Curva de Número é (SCS, 1972):

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{(R_{\text{day}} - I_a + S)} \quad (5)$$

Onde:

Q_{surf} : é o escoamento superficial total (mm H₂O)

R_{day} : é a precipitação total diária (mm H₂O)

I_a : é a abstração inicial que inclui armazenamento de superfície, interceptação e infiltração antes do escoamento superficial (mm H₂O).

S : é o parâmetro de retenção.

O parâmetro de retenção varia espacialmente devido a mudanças no uso da terra, solos, manejo e declividade e temporalmente devido a mudanças no conteúdo de água do solo.

Os principais fatores que determinam o valor do Curva de Número são: o grupo hidrológico do solo; o tipo de uso da terra; o manejo utilizado nas diferentes práticas agrícolas o qual envolve desde o uso de máquinas para construir terraços até a rotação de culturas; a condição hidrológica; e a condição que antecede o escoamento superficial a qual representa a variabilidade do CN em um determinado sítio para cada evento de chuva (MAIDMENT, 2005). Ao longo dos anos o método CN se tornou a mais popular ferramenta para cálculo do *runoff*, devido a sua relativa facilidade de uso, disponibilidade de dados confiáveis e ter sido desenvolvido por uma agência altamente credenciada.

A principal razão da grande popularidade do uso do método da CN é a sua simplicidade, requerendo somente quatro características da bacia hidrográfica. O CN é um método empiricamente baseado em dados da relação entre intensidade da chuva, condições da superfície da terra e volume de *runoff*, pois o valor da Curva Número uma função do uso e cobertura da terra, condições hidrológicas, grupo hidrológico do solo e condições de umidade antecedente. Cada um destes fatores pode apresentar alta variabilidade espacial, dificultando a determinação precisa dos valores da CN para todas as áreas de uma bacia hidrográfica isso pode ser exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 -Valores dos números CN da curva de *runoff* para bacias rurais

Uso da terra	Superfície do solo	Grupo do Solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79

Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: (Tucci et al, 1993)

2.6.3.1 Grupos Hidrológicos dos Solos

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

- Grupo hidrológico A – solos com alta taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada >150 mm/hr, solos constituídos de areias grossas e excessivamente drenados. Estes solos têm alta taxa de transmissão de água (baixo *runoff* potencial);

- Grupo hidrológico B – solos com moderada taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 5 e 150 mm/hr, solos constituídos de sedimentos moderadamente grossos a moderadamente finos, e moderadamente bem drenados. Estes solos têm moderada taxa de transmissão de água;

- Grupo hidrológico C – solos com baixa taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/hr, com textura moderadamente fina a muito fina, que impedem o movimento da água nos horizontes. Estes solos têm baixa taxa de transmissão de água (alto *runoff* potencial);

- Grupo hidrológico D – solos com baixíssima taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada menor 1mm/hr, são solos potencialmente argilosos com altíssimo *runoff* potencial, esses solos têm baixíssima taxa de transmissão de água.

2.6.4 Propagação no curso d'água

A propagação no curso d'água consiste nos componentes: (1) propagação da vazão líquida; (2) propagação da vazão sólida; e (3) propagação química. A descrição detalhada dos componentes do método de propagação pode ser consultada em Arnold et al. (1998).

2.6.4.1 Propagação da vazão líquida no curso d'água

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 n do curso d'água. Além de necessitar de declividade e n da margem de inundação.

A taxa de escoamento e a velocidade média são calculadas a partir da equação de Manning e o tempo de propagação é computado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade. O fluxo a partir do curso d'água é ajustado para a perda por transmissão, evaporação e fluxo de retorno.

2.6.4.2 Propagação da vazão sólida no curso d'água

O transporte de sedimentos nos cursos d'água o SWAT utiliza a função de dois processos que ocorrem simultaneamente: (1) deposição; e (2) degradação. A componente deposição é baseada na velocidade de queda e a componente degradação tem como base o conceito de força de escoamento desenvolvido por Bagnold (1977).

A deposição no curso d'água através das sub-bacias é baseada na velocidade de queda das partículas de sedimentos. A velocidade de queda é calculada como função do diâmetro das partículas fundamentada na Lei de Stokes.

A degradação é determinada pela força de escoamento. A força de escoamento é definida por Bagnold (1977) como o produto da densidade de água, da taxa de vazão e da declividade da água superficial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa. Neste capítulo é apresentada a descrição do funcionamento do modelo SWAT, caracterização da área de estudo, a base de dados de entrada utilizada neste estudo, além das análises estatísticas utilizadas.

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A bacia do rio das Pedras localiza-se no município de Guarapuava, região Centro-Sul do Estado do Paraná, a bacia situa-se entre as coordenadas geográficas 25° 12' S e 25° 26' S de latitude, 51° 13' W e 51° 28' W de longitude, com área de 332,01 km² (Figura 5). A bacia desenvolve-se no reverso da escarpa basáltica, localmente denominada Serra da Esperança, sendo que para oeste chega-se a limitar com o perímetro urbano de Guarapuava, iniciando a 1280 m de altitude na Serra da Esperança e terminando na sua foz a 950 m de altitude.

Geologicamente o município assenta-se sobre rochas vulcânicas ácidas (dacitos, latitos, quartzo-latitos, riodacitos e riolitos) e básicas (basaltos tabulares maciços, basaltos lobados, basaltos hipovítreos e basaltos fácies campo Erê) da Formação Serra Geral (TRATZ, 2009). Também o vulcanismo gerou diferentes tipos de rochas, sendo que no município de Guarapuava podem ser encontradas sequências ácidas (riodacitos) e sequências básicas (basaltos) (NARDY, 1999). Tem sua morfologia marcada pelos blocos planálticos, planaltos de dissecação por drenagem e, por áreas altas e planas, os platôs de Guarapuava, Entre Rios e Três Pinheiros (TRATZ, 2009).

Em relação à hidrografia, na área abrangida pelo município de Guarapuava, a drenagem é comandada pelas redes hidrográficas dos rios Piquirí e Iguaçu. Dentre os vários afluentes do rio Iguaçu encontra-se o rio Jordão, cuja importância local deve-se ao fato do mesmo ser responsável pela drenagem de grande parte do município de Guarapuava. Seus principais afluentes são os rios das Mortes e das Pedras, que drenam o trecho nordeste do município; o rio Bananas e o rio Pinhão, situados, respectivamente, a leste e sul; e os rios Coutinho e São João, que drenam o noroeste do município (CAMARGO FILHO, 1997).

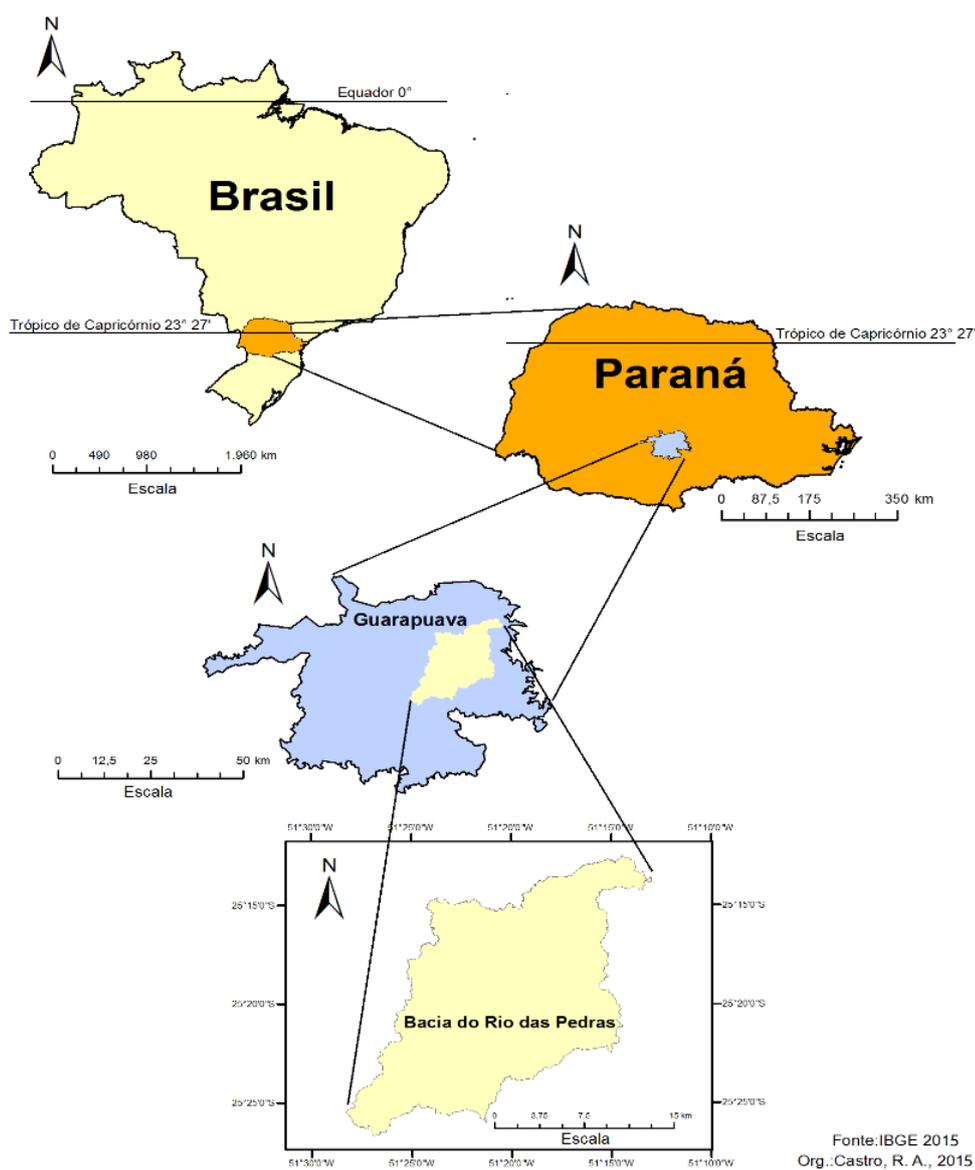


Figura 5 – Mapa de localização da Bacia do rio Das Pedras.

3.1.1 Clima

Em relação ao clima de Guarapuava, está sob o domínio da zona extratropical, o que resulta em temperaturas com caráter mesotérmico, temperaturas anuais médias entre 16° e 20°C, inverno frio e verão amenizado pelas altitudes (THOMAZ e VESTENA, 2003). A classificação climática do município, segundo Köppen, classifica-se como Cfb, o que significa

que o clima é pluvial, sempre úmido, com verões chuvosos e frescos (MAACK, 1981). É classificado como subtropical mesotérmico – úmido - sem estação seca, com verões frescos e invernos moderados.

A pluviosidade mostra-se bem distribuída ao longo do ano, com precipitações médias anuais em torno de 1.961 mm, apresentando variações extremas consideráveis; a temperatura média anual fica em torno de 16 a 17,5° C.

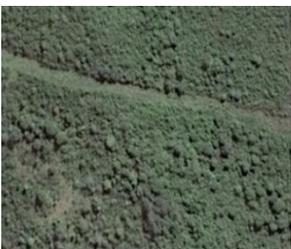
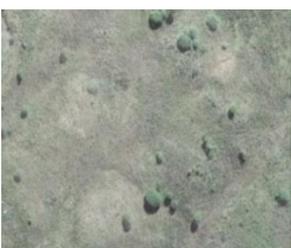
3.1.2 Uso da terra e rede drenagem

Foram utilizadas as cartas topográficas digitais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e imagem em SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para delimitar a bacia, gerar o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e determinar a rede de drenagem. Para o mapa de usos e cobertura da terra da região foram utilizados imagens do satélite. Em seguida os dados foram inseridos no software ArcGis e posteriormente no modelo SWAT.

Após a inserção do mapa de uso da terra (Quadro 1 e Figura 6) no modelo, ocorre a reclassificação desse mapa, onde o SWAT busca em seu banco de dados, de acordo com as classes correspondentes, os índices de área foliar máximo, profundidade máxima das raízes da vegetação específica.

Quadro 1 - Caracterização dos diferentes usos e ocupação da terra.

	<p>Agricultura Mecanizada</p>	<p>Talhões de plantações de culturas temporárias e de ciclo anual.</p>
	<p>Agricultura Tradicional</p>	<p>Agricultura utiliza que técnicas rudimentares (uso da enxada, da queimada, do arado e por tração animal).</p>

	<p>Banhados</p>	<p>Ambiente úmido, com solo não drenado.</p>
	<p>Vias Não Pavimentadas</p>	<p>Rodovias, vias urbanas e vias rurais que não apresentam pavimento asfáltico ou de concreto</p>
	<p>Floresta Nativa em Estágio Inicial</p>	<p>Floresta secundárias resultantes de um processo natural de regeneração da vegetação, em áreas onde no passado houve corte raso da floresta primária.</p>
	<p>Floresta Nativa</p>	<p>A floresta primária, intocada ou aquela em que a ação humana não provocou significativas alterações das suas características originais de estrutura e de espécies.</p>
	<p>Pastagem</p>	<p>Vegetação utilizada para a alimentação animal.</p>
	<p>Reflorestamento</p>	<p>Áreas de plantio de árvores (silvicultura) com finalidade comercial ou de preservação, com espécies do gênero Pinus ou Eucalyptus.</p>

	<p>Rios e Lagos</p>	<p>Áreas que contém permanentemente uma quantidade variável de água.</p>
	<p>Rodovia Pavimentada</p>	<p>Rodovias e vias urbanas que apresentam sua superfície de rolamento com pavimento asfáltico ou de concreto.</p>
	<p>Áreas Construídas</p>	<p>Áreas Construídas em sedes de propriedades rurais.</p>
	<p>Áreas Urbanizadas</p>	<p>Áreas de urbanização que apresentam entre 50 e 70% de impermeabilização.</p>

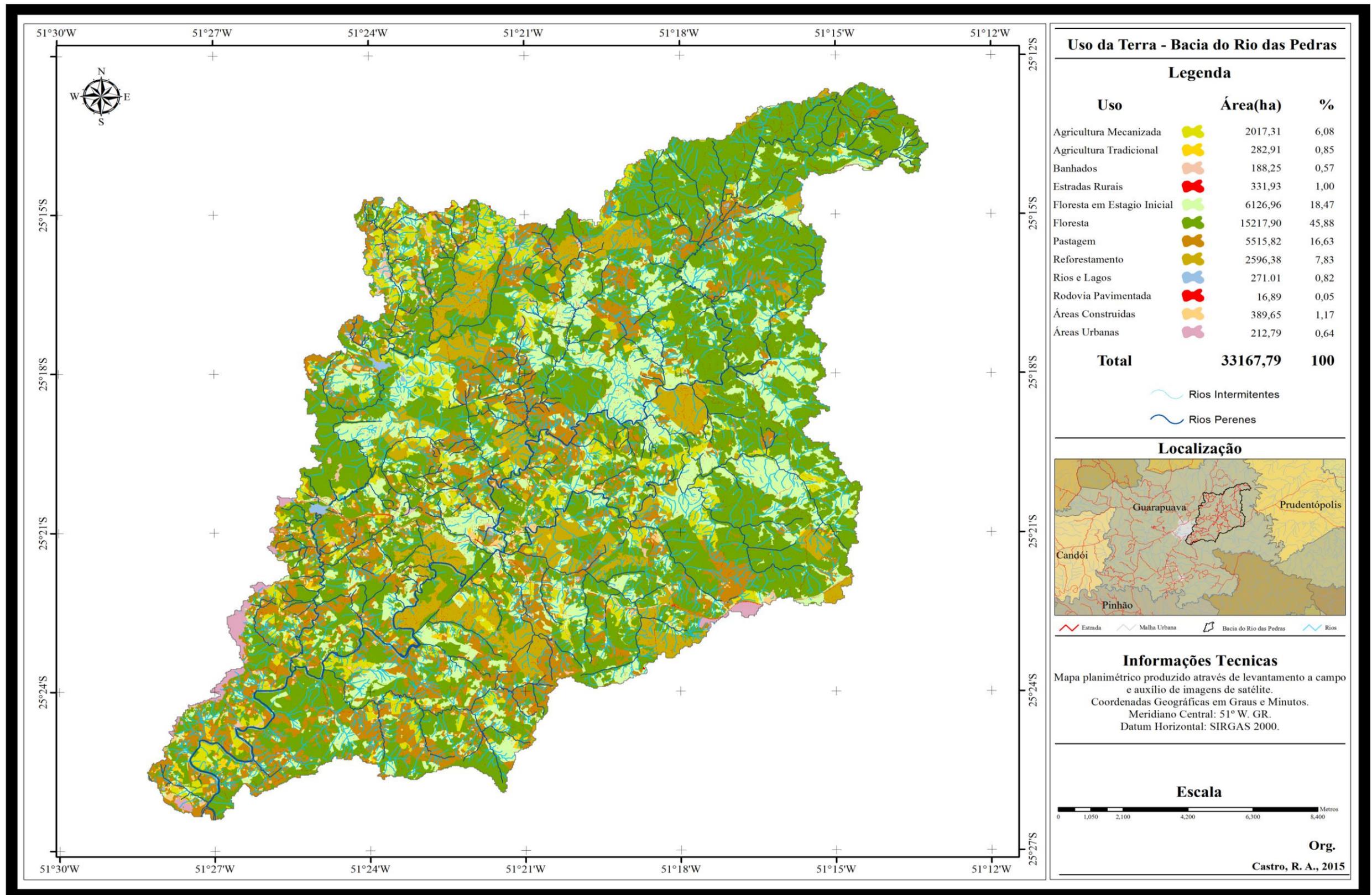


Figura 6 – Mapa de uso da terra e hidrografia da bacia do Rio Pedras em 2013.

A bacia possui uma área de 331 km², sendo 33,40 km do comprimento total da bacia evidenciado na Figura 6. A área de drenagem de uma bacia hidrográfica é o elemento básico para o cálculo da maioria das características físicas que a representam (VILELLA e MATTOS, 1975). Segundo Tucci (1997), a área da bacia é fundamental para definir a sua potencialidade hídrica e tem grande importância na sua resposta hidrológica, pois, se desconsiderarmos os outros fatores, quanto maior a área, menos pronunciados serão os picos de enchentes, pois maior será o tempo para que toda a bacia contribua de uma só vez.

A densidade de drenagem³ é um fator importante na indicação do grau de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia. Sendo assim, este índice, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia (ANTONELI e THOMAZ, 2007).

A densidade de drenagem dá indicação da eficiência da drenagem natural de uma bacia, e conseqüentemente a tendência para a ocorrência de cheias. De acordo com Christofolletti (1980), o comportamento hidrológico das rochas reflete na densidade de drenagem. Rochas que dificultam a infiltração contribuem para o escoamento superficial, favorecendo a esculturação de canais. A densidade de drenagem também é um bom indicador da permeabilidade do solo: Solos arenosos, mais permeáveis, apresentam densidade de drenagem menor do que solos mais argilosos.

A bacia em questão apresentou densidade de drenagem igual a 3,4 km/km². Beltrame (1994) sugeriu uma classificação em faixas para a densidade de drenagem como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação da densidade de drenagem (Dd)

Dd (Km/km²)	Denominação
<0,50	Baixa
0,50 - 2,00	Mediana
2,01 - 3,50	Alta
> 3,50	Muito Alta

Fonte: Beltrame (1994).

Neste sentido, de acordo com a classificação de Beltrame (1994), a bacia do Rio das Predas se enquadra na faixa de densidade de drenagem alta por apresentar valor de 3,4

³ A densidade de drenagem (Dd) é a relação entre o comprimento total de canais e a área da bacia e para seu cálculo, devem-se considerar todos os rios tanto os perenes como os temporários (HORTON, 1945).

Km/Km². Segundo Linsley et al. (1978), uma densidade de drenagem alta reflete uma bacia altamente dissecada, que responde de maneira relativamente rápida a uma determinada quantidade de chuva, enquanto uma densidade de drenagem baixa reflete uma bacia de drenagem pobre com respostas hidrológicas lentas.

3.1.3 Relevô

Segundo Guerra e Cunha (2004) a declividade é a informação básica de topografia utilizada nas metodologias de identificação de áreas potenciais ao processo de erosão. Nessa linha de raciocínio Villela e Mattos (1975) salientam que a declividade relaciona-se com a velocidade em que se dá o escoamento superficial, afetando, portanto, o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem das bacias, sendo que os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia. Ross (1994) propõe cinco graus de fragilidade em relação à capacidade de uso e aptidão agrícola, sendo essas: 1- Muito fraco; 2 – Fraco; 3 – Médio; 4 – Forte; 5 – Muito forte.

No total foram obtidas cinco classes de declividade para a bacia em questão como podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Classes de Declividade

Declividade (%)	Categorias Hierárquicas
0 – 6	1- Muito fraco
6 - 12	2- Fraco
12 - 20	3- Médio
20 - 30	4- Forte
> 30	5- Muito forte

Fonte: Ross (1994).

As classes de declividade não se distribuem com frequência semelhante em todos os setores da bacia, sendo a declividade irregular no domínio da bacia. Ou seja, a predominância de declividade na bacia refere-se às classes > 12% somando 52,1% da área. Já a área de 47,9% representam as classes de ≤ 12%, e estão presentes próximos aos cursos fluviais e áreas a montante da bacia. Sendo assim a bacia pode ser caracterizada com os terrenos de declividades média predominante de (12 a 20%), a Forte (20 a 30% e ≥ 30%) Figura 7.

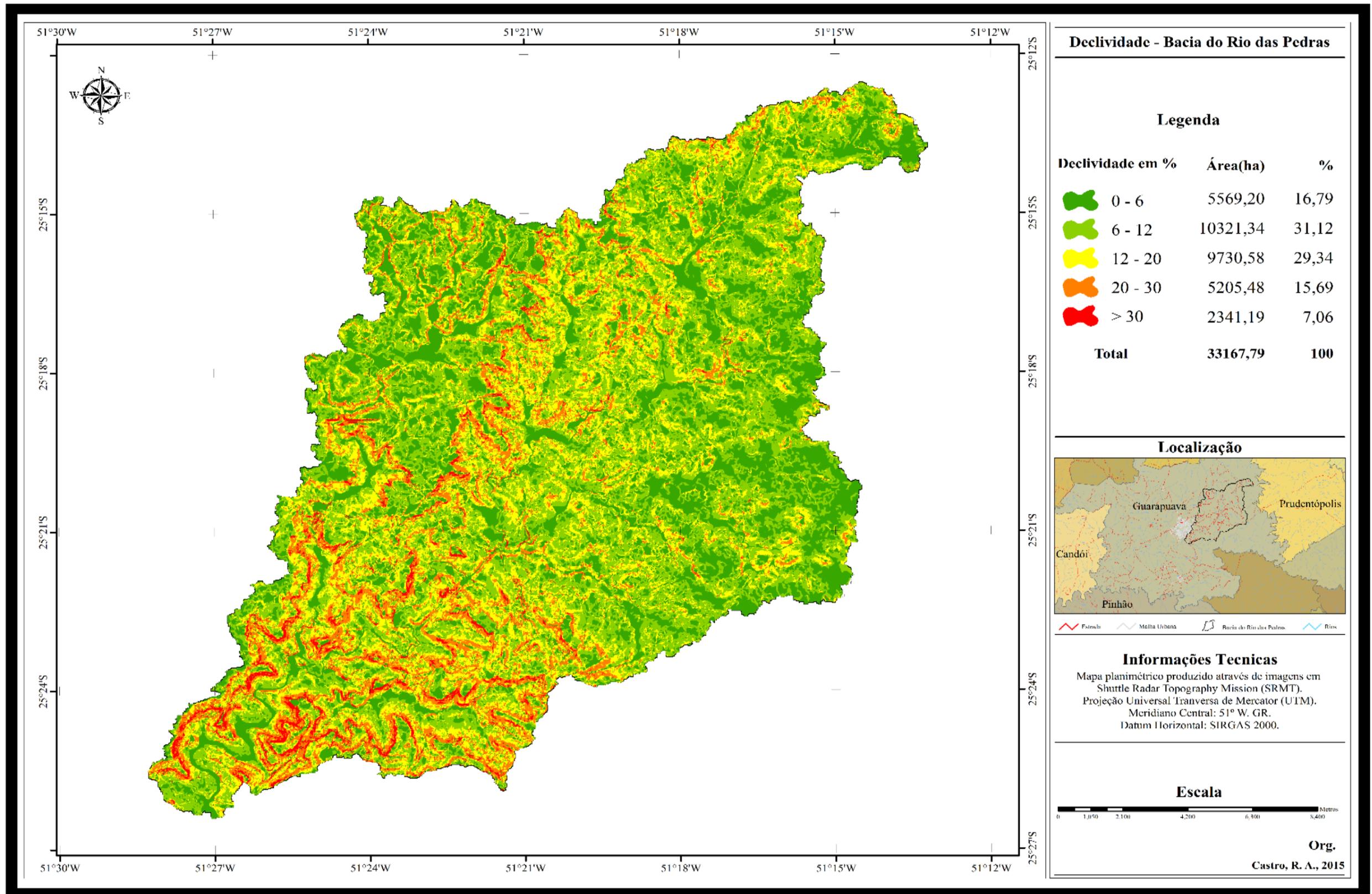


Figura 7 - Mapa de declividade da bacia do Rio das Pedras.

3.1.4 Solos

Quanto aos tipos de solos e suas propriedades físicas, as características texturais e estruturais influenciam expressivamente a movimentação da água, uma vez que determinam a quantidade de macroporos presentes em seu perfil. Solos de textura grossa (arenosos), por exemplo, possuem maior quantidade de macroporos que os de textura fina (argilosos) e conseqüentemente, apresentam maiores condutividade hidráulica e taxa de infiltração. De maneira geral, o aumento ou redução do tamanho dos poros interconectados que transmitem água no solo afetam a infiltração (MANNING, 1992; BRANDÃO et al., 2003).

O mapa de solos foi gerado com o auxílio do software Arcgis, para este trabalho foi utilizado os dados da área correspondente à bacia do Rio das Pedras no Mapa do Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Centro-Sul do Estado do Paraná elaborado pela Embrapa (1979) dados esses na escala de 1/250.000. A delimitação dos diferentes tipos de solos presentes na área da bacia em estudo foi feita apenas na fase de escritório, sem identificação de campo (Figura 8).

Além do mapa de solos o modelo Swat requer um banco de dados com diversas informações a respeito das características físico-hídricas de cada classe de solo, como o número de camadas (NLAYERS), os grupos de saturação (HYDGRP), porosidade (ANION_EXCL), profundidade de cada horizonte (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentual de argila (CLAY), silte (SILT), areia (SAND) e cascalho (ROCK)

Por não haver estudos direcionados a este propósito na bacia do Rio das Pedras, utilizou-se neste as funções de pedotransferência baseada no método de Saxton e Rawls (SAXTON and RAWLS, 2006) para o cálculo das características físico-hídricas. Utilizou-se como principal “input” os dados granulométricos provenientes do estudo de detalhamento das classes de solos e de suas unidades de mapeamento da EMBRAPA (1979).

Segundo Saxton e Rawls (2006) as funções de pedotransferência são equações usadas para estimar características edáficas de difícil determinação a partir de outras mais facilmente obtidas. As equações desenvolvidas apresentaram bons coeficientes de determinação e baixo erro de predição.

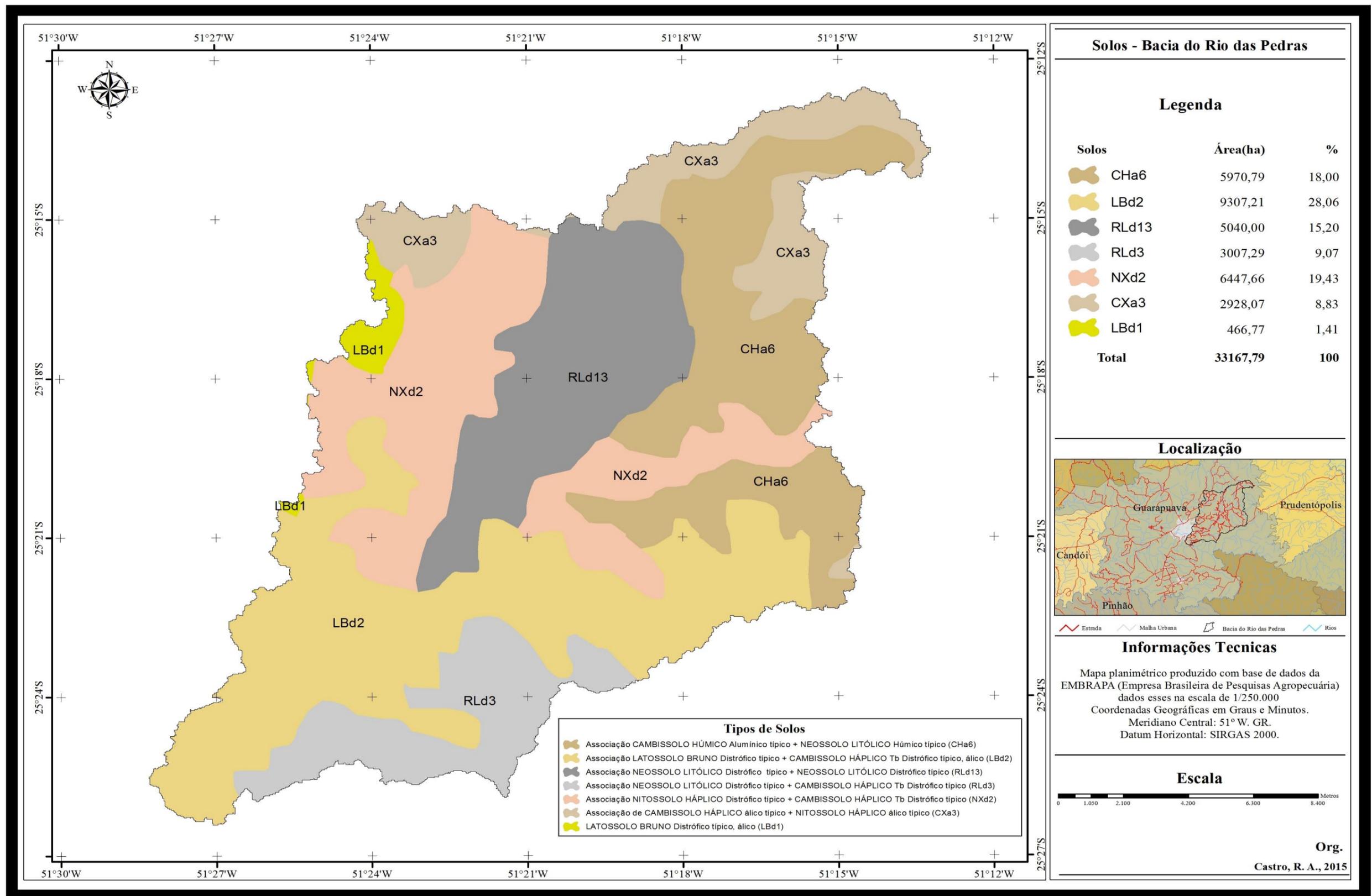


Figura 8 - Mapa de tipos de solos da bacia do Rio das Pedras.

3.2 Dados Climáticos e Fluviométricos

Os dados climáticos foram obtidos por meio do site da Agência Nacional de Águas (ANA) – www.ana.gov.br – no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB). Os dados climáticos requeridos pelo SWAT são precipitação total diária, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura máxima e mínima do ar. E para a simulação de produção de sedimentos e vazão foram utilizados dados da estação fluviométrica ETA-Guarapuava (Tabela 2 e Figura 9).

Tabela 2 - Estações pluviométricas e fluviométrica

NOME DA ESTAÇÃO	TIPO	OPERADORA	CÓDIGO
Guarapuava	Pluviométrica	AGUASPARANÁ	02551000
Colégio Agrícola	Climatológica	IAPAR	02551010
Invernadinha	Pluviométrica	AGUASPARANÁ	02551034
Campo de Dentro	Pluviométrica	AGUASPARANÁ	02551035
Guarapuava	Climatológica	INMET	02551006
ETA - Guarapuava	Fluviométrica	AGUASPARANÁ	65809000

Org. Castro, R. A. (2015)

As entradas no modelo consistem em dados meteorológicos diários tais como temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa, evapotranspiração, precipitação e radiação solar. Na ocasião de não existirem alguns desses dados medidos, pode-se solicitar que o modelo simule os mesmos através do gerador climático WXGEN pertencente ao modelo. Os parâmetros a serem usados pelo WXGEN apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição dos parâmetros climáticos utilizados pelo WXGEN.

Parâmetro	Descrição	Unidade
TMPMX(mon)	Média da temperatura máxima diária no mês	°C
TMPMN(mon)	Média da temperatura mínima diária no mês	°C
TMPSTDMX(mon)	Desvio padrão da temperatura máxima diária no	°C
TMPSTDMN(mon)	Desvio padrão da temperatura mínima diária no	°C
PCPMM(mon)	Média da precipitação total mensal	mm
PCPSTD(mon)	Desvio padrão para precipitação diária no mês	mm
PCPSKW(mon)	Coefficiente de assimetria da precipitação diária no	-
PR_W(1,mon)	Probabilidade de um dia húmido seguir um dia seco	-
PR_W(2,mon)	Probabilidade de um dia húmido seguir um dia	-
RAINHHMX(mon)	Precipitação máxima de 0,5 hora no período de	mm
SOLARAV(mon)	Média da radiação solar diária no mês	MJ/m ² /day
DEWPT(mon)	Média da temperatura do ponto de orvalho no mês	°C

Os dados climáticos necessários para a aplicação do modelo SWAT podem ser dados reais (observados) ou gerados por uma rotina de cálculo (WXGEN), desenvolvida por Sharpley e Williams et al, (1990). A rotina de cálculo que gera os dados climatológicos é também usada para preenchimento de falhas nos dados registados. Para esse estudo os dados diários de radiação solar e velocidade do vento foram gerados diretamente pelo modelo, utilizando o gerador climático WXGEN.

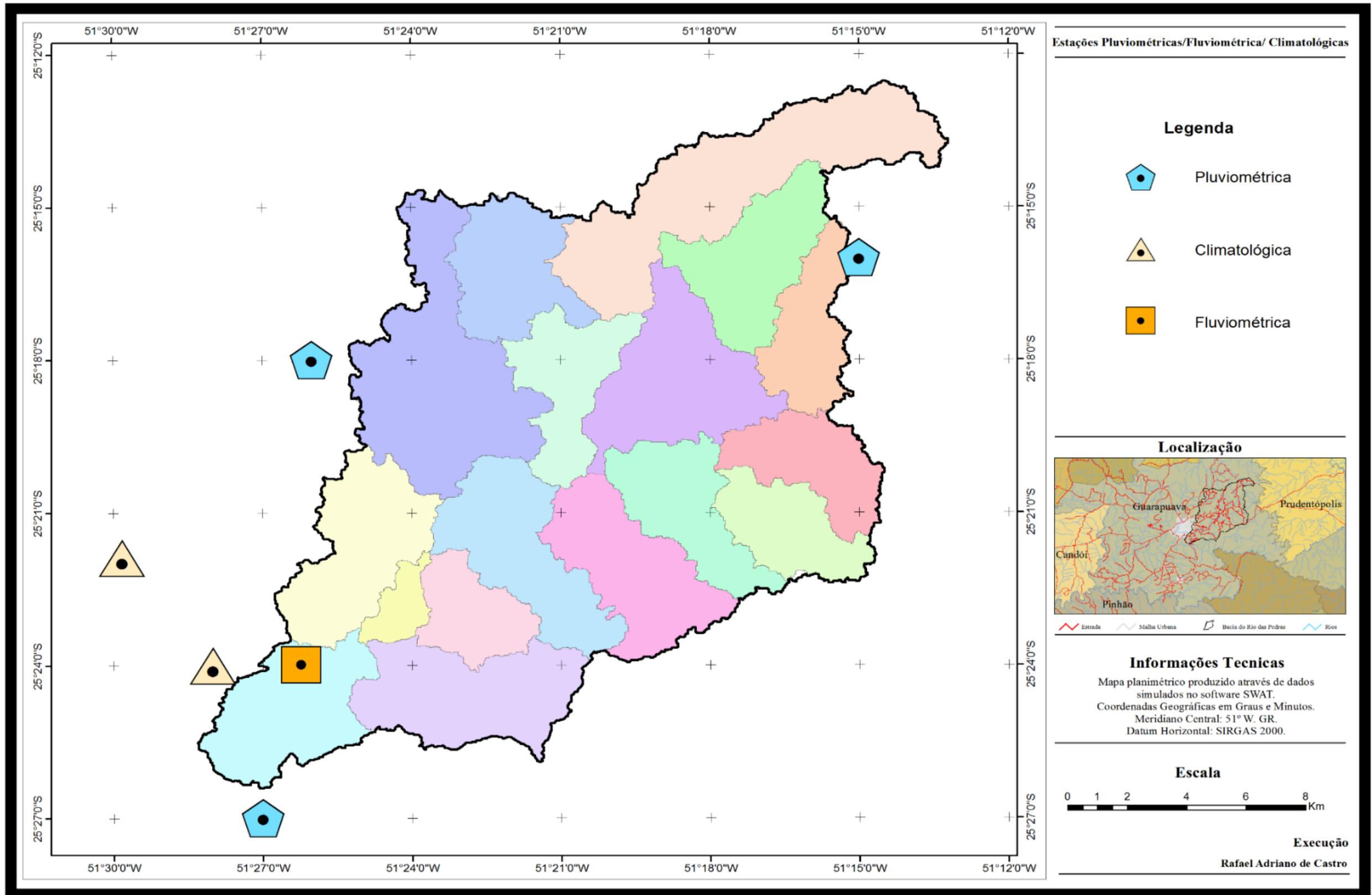


Figura 9 - Localização das Estações (pluviométricas, climatológicas e fluviométricas).

3.3 Sub-divisões da Bacia Rio das Pedras e as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)

Após a criação do projeto e a definição do sistema de projeção, delimitou-se a BRP, a partir do MDT. Nesta etapa, utilizou-se o *SWAT Watershed delineator*, o qual realiza o delineamento da bacia com as ferramentas presentes no *Spatial Analyst*, calculando-se, de acordo com as cotas de altitude do MDT, a direção do fluxo de drenagem, o fluxo de drenagem acumulado, e a definição dos limites da bacia hidrográfica, a rede de drenagem, e respectivas sub-bacias (Figura 11 e Tabela 4) com seus exutórios.

Para definição da rede de drenagem o SWAT utiliza o método V8 para calcular a direção e a acumulação do fluxo, sendo que neste método o fluxo é direcionado de acordo com o valor de altitude de cada pixel, o qual possui oito possíveis direções para o fluxo e vai na direção do pixel com menor altitude. Beven (2001) aponta que a determinação do fluxo de drenagem através de MDT é interessante, porém baseia-se no princípio que a rede de drenagem é controlada principalmente pela topografia do terreno.

Após a fase de delineamento da bacia hidrográfica, com suas sub-bacias, rede de drenagem, entre outros, foram definidas as unidades de resposta hidrológica (HRU) para o modelo SWAT. Nesta etapa, foi realizado, primeiramente, a compatibilização entre os dados de uso da terra, classes de declividade e tipo de solo (Figura 10).

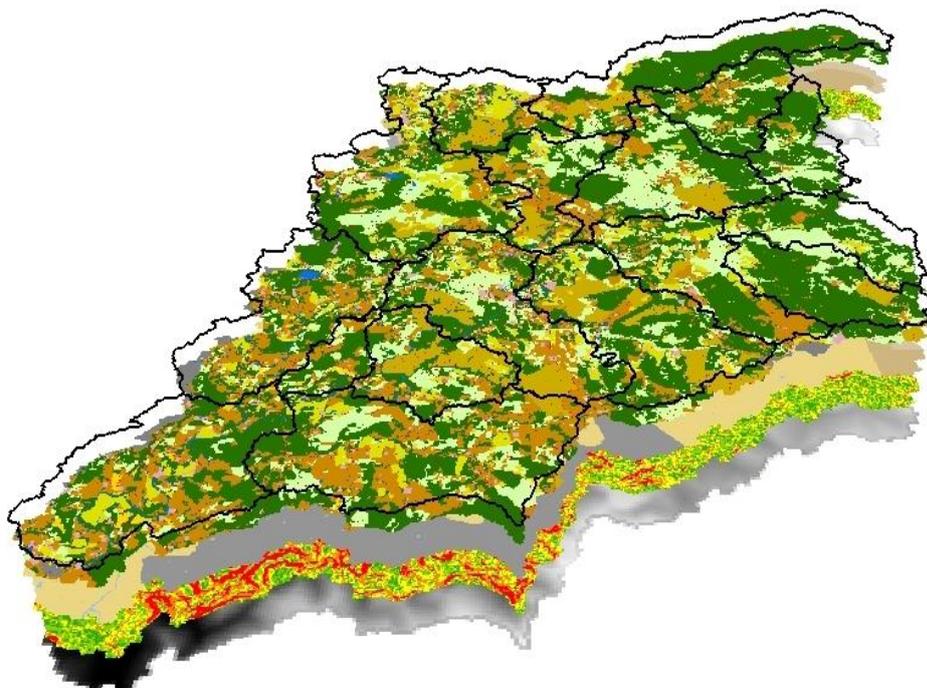


Figura 10 - Planos cartográficos para gerar as HRUs

Finalmente, após terem sido obtidos o mapa de declividade, bem como os mapas de uso da terra e de solos foi possível realizar a sobreposição desses mapas criando as HRU's. Na geração dos HRUs, o mapa de uso do terra cobriu 99,92% da bacia, mapa de solos 100% e as classes de declividades definidas foram os limites 6%, 12%, 20% e >30%. A sensibilidade entre as camadas para a geração dos HRUs foi definida de em 10% para cada relação, utilizando da opção múltiplos HRUs por sub-bacia. O programa gerou 165 diferentes HRUs com a intersecção das três camadas geradas, solos, uso e ocupação e declividade.

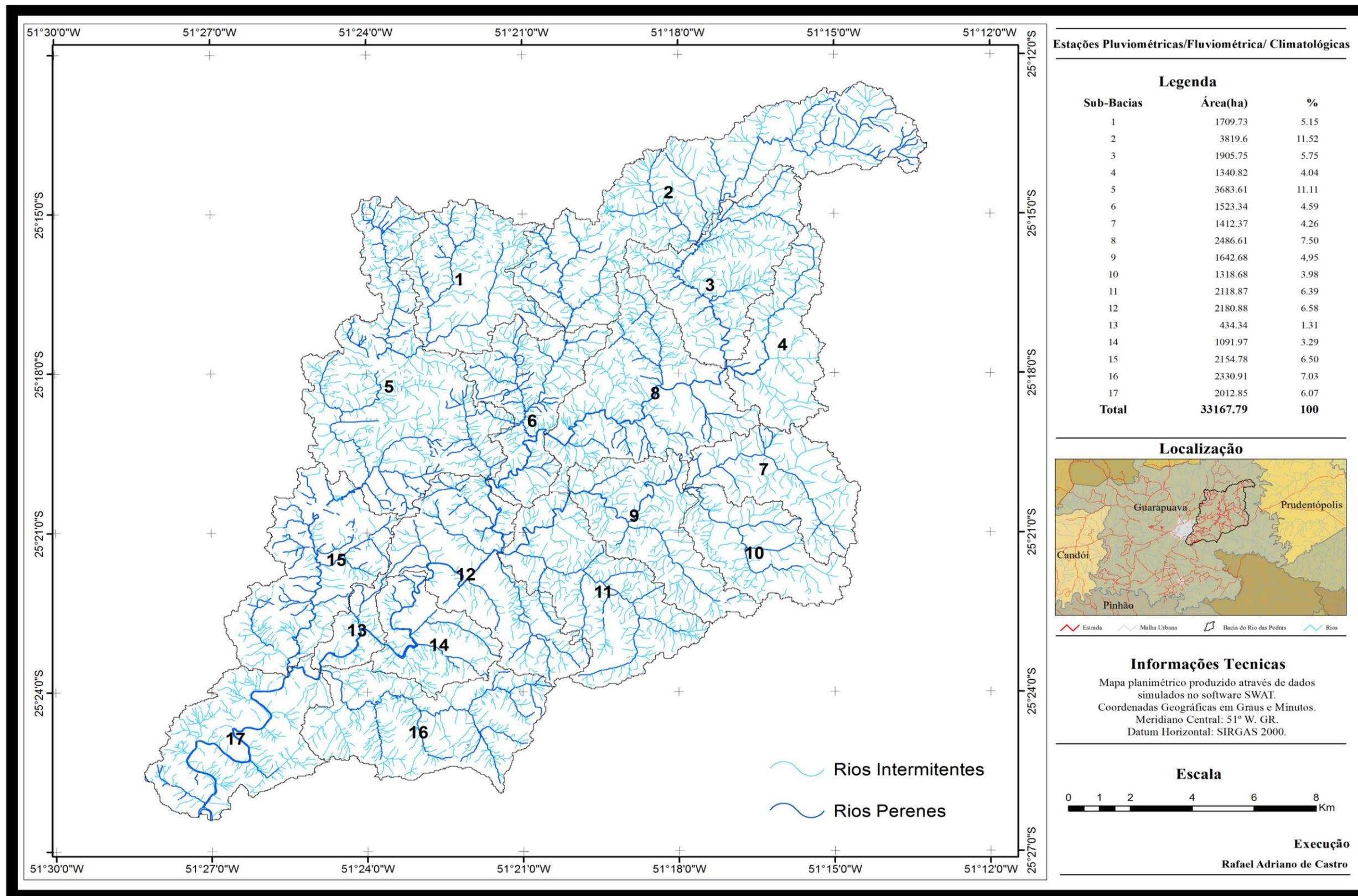


Figura 11 – Sub-bacias do Rio das Pedras.

Tabela 4 - Características das sub-bacias

	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6	Sub-Bacia 7	Sub-Bacia 8	Sub-Bacia 9	Sub-Bacia 10	Sub-Bacia 11	Sub-Bacia 12	Sub-Bacia 13	Sub-Bacia 14	Sub-Bacia 15	Sub-Bacia 16	Sub-Bacia 17	
Total de área em hectare (ha)	1709,73	381,6	1905,75	1340,82	3683,61	1523,34	1412,37	2486,61	1642,68	1318,68	2118,87	2180,88	434,34	1091,97	2154,78	2330,91	2012,85	
Porcentagem da áreas	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	% da Área	
Uso do terra	Agricultura Tradicional	0,67	0,14	0,34	-	0,82	5,16	0,48	0,39	0,25	0,07	4,54	5,21	7,83	2,86	6,14	6,31	6,68
	Agricultura Mecanizada	17,67	2,97	-	-	11,16	0,21	4,27	6,41	7,24	6,06	2,01	1,08	2,81	1,01	1,82	1,25	2,79
	Áreas Urbanas	0,19	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	2,12	-	-	-	2,54	-	3,29
	Banhados	-	0,50	0,05	0,02	0,08	0,05	-	-	2,6	-	0,37	0	0,8	-	0,55	0,05	0,03
	Estradas não pavimentadas	8,08	1,07	0,86	0,87	0,81	0,91	0,94	1,33	1,1	0,64	0,9	1,35	1,72	1,93	0,95	0,93	0,9
	Floresta em Estagio Inicial	-	11,58	20,36	28,8	21,92	18,5	35,35	31,68	21,5	13,4	16,15	18,86	10,8	22,46	10,83	18,63	7,34
	Floresta	37,03	67,62	64,61	65,6	40,98	36,3	51,05	35,43	41,3	64,39	41,4	31,96	52,97	30,71	44,72	39,34	42,23
	Pastagem	13,6	9,10	10,76	1,54	14,41	28,97	2,98	14,63	16,75	11,31	10,96	18,91	21,61	22,51	29,9	31,42	34,06
	Reflorestamento	21,15	6,75	2,39	2,87	6,15	8,55	4,3	9,15	6,81	3,73	20,64	20,21	-	17,42	-	0,52	0,05
	Rios	0,76	0,08	0,38	0,29	1,85	0,76	0,58	0,88	0,57	0,03	0,59	1,84	0,15	1,1	2,11	0,32	1,95
	Rodovia Pavimentada	-	-	-	-	0,01	-	-	-	0,08	0,1	0,27	0,18	1,91	-	0,19	-	-
Áreas Construídas	0,85	0,19	0,25	0,01	1,81	0,59	0,05	0,1	0,3	0,27	0,05	0,4	0,12	-	0,25	1,23	0,68	
Tipo de Solo	CXa3	19,95	34,89	26,28	24,24	10,07	-	0,75	-	-	3,02	0,82	-	-	-	-	-	
	CHa6	-	32,94	57,76	70,86	-	-	73,67	27,84	28,57	33,04	-	-	-	-	-	-	
	LBd1	-	-	-	-	11,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,39	-	
	LBd2	-	-	-	-	11,8	-	2,6	-	37,85	63,94	67,63	42,7	97,98	60,8	74,65	25,62	
	RLd3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,82	26,98	-	34,58	-	74,38	
	RLd13	6,36	28,29	15,96	-	10,17	82,17	-	52,77	-	-	8,33	17,22	-	2,1	-	-	
NXd2	73,69	3,88	-	4,9	56,63	17,83	22,98	19,39	33,58	-	22,4	13,1	2,02	2,52	23,96	-		
Declividade (%)	0-6	30,16	22,97	28,26	29,15	28,14	21,35	34,74	20,79	30,48	30,78	23	17,91	16,66	17,6	18,7	14,35	
	6-12	23,84	31,21	31,65	34,18	31,45	25,67	34,6	29,08	34,47	34,45	33,03	26	17,41	19,72	24,16	20,41	
	12-20	30,98	29,24	26,21	26,05	23,8	29,26	21,88	30,84	24,76	23,75	28,47	29,09	25,45	25,66	27,54	25,69	
	20-30	11,72	13,09	11,22	8,98	11,37	17,3	7,36	15,33	8,87	9,13	12,55	18,42	23,75	22,28	18,55	22,13	
	> 30	3,3	3,49	2,66	1,64	5,24	6,42	1,42	3,96	1,42	1,89	2,95	8,58	16,73	14,74	11,05	17,42	

Org. Castro, R. A. (2015)

Vale ressaltar, que não há interação entre as HRUs, apenas entre as sub-bacias. Ou seja, as cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes, etc) não são transmitidas de uma HRU para outra dentro de cada sub-bacia. As cargas por HRU, são calculadas separadamente e depois somadas para determinar as cargas totais da sub-bacia, que a partir dessa são transpostas à sub-bacia conseguinte. O benefício de trabalhar com as HRUs é o aumento da precisão que contribuem para a predição das cargas, em que a consideração da diversidade da cobertura vegetal, do crescimento e do desenvolvimento das espécies, pode tornar muito mais preciso o valor líquido das cargas de cada sub-bacia.

3.4 Simulação de Cenários

Com o objetivo de testar a aplicabilidade do modelo em simular de forma contínua a vazão, escoamento superficial e a produção de sedimentos na bacia de Rio das Pedras, e o quanto que as alterações no uso da terra interferem nestes parâmetros, dois cenários foram definidos considerando as características de solo apresentadas anteriormente:

Cenário 1: Considerou-se o uso da terra atual.

Cenário 2: Considerou-se que a bacia ocupada pela floresta nativa.

3.5 Análise de sensibilidade

Previamente ao ajuste dos parâmetros do modelo para a calibração, foi realizada a análise de sensibilidade das variáveis, a qual determina quais parâmetros que mais influenciaram na simulação inicial e que podem ser utilizados como ponto de partida para a calibração do modelo.

Segundo Arnold et al. (2000), o modelo SWAT é sensível a diversas variáveis relacionadas às variáveis físicas e climáticas. Arnold et al. (2000), relata que o modelo SWAT é sensível a mais de 100 variáveis relacionadas à vegetação, manejo do solo, pedologia, clima, aquíferos, canal e reservatório. Os parâmetros que comumente apresentam maior sensibilidade são os descritos no manual do modelo SWAT (NEITSCH et al., 2005).

As principais variáveis que apresentam maior sensibilidade quanto à vegetação, manejo do solo, pedologia (solos), clima, aquíferos, canal e reservatório, utilizados na modelagem deste trabalho estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 - Principais variáveis de maior sensibilidade, limites inferior (LI) e superior (LS) do parâmetro.

Parâmetro	Nome	LI	LS	Método de Variação	HRUs
Alpha_Bf	Constante de recessão do escoamento de base (dias)	0	1	Substituição direta	Todas
Biomix	Eficiência do revolvimento biológico	0	1	Substituição direta	Todas
Blai	Índice do potencial máximo de área foliar	0	1	Substituição direta	Todas
Canmx	Armazenamento máximo do dossel (mm H ₂ O)	0	10	Substituição direta	Todas
Ch_K	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	0	150	Substituição	Todas
Ch_N	Coefficiente de rugosidade de Manning	0,025	0,065	Substituição direta	Todas
CN2	Curva-Número para a condição de umidade II	-25	25	Multiplicação (%)	Todas
Epc0	Fator de compensação de água pelas plantas	0	1	Substituição direta	Todas
Esco	Fator de compensação de evaporação do solo	0	1	Substituição direta	Todas
Gw_Delay	Tempo de retardo da água subterrânea (dias)	20	300	Substituição direta	Todas
Gw_revap	Coefficiente "revap" de água subterrânea	0,02	0,2	Substituição direta	Todas
Gwqmn	Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície	0	1000	Soma	Todas
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo	0	1	Substituição direta	Todas
Revapmn	Profundidade de água limite em aquífero raso para que ocorra "revap" (mm H ₂ O).	0	500	Substituição direta	Todas
Sftmp	Temperatura de queda de neve (°C)	0	5	Substituição direta	Sub-bacia
Slope	Declividade média (m)	-25	25	Multiplicação	Todas
Slsbbsn	Comprimento da declividade média (m)	-25	25	Multiplicação (%)	Todas
Smfmn	Fator de derretimento de neve no dia 21 de dezembro (mm H ₂ O·°C dia)	0	10	Substituição direta	Sub- bacia
Smfmx	Fator de derretimento de neve no dia 21 de junho (mm °C dia)	0	10	Substituição direta	Sub- bacia
Smtmp	Temperatura base de derretimento de neve (°C)	-25	25	Multiplicação (%)	Sub-bacia
Sol_Alb	Albedo do solo úmido	-25	25	Multiplicação (%)	Todas
Sol_Aw c	Teor de umidade disponível nas camadas do solo (mm)	-25	25	Multiplicação (%)	Todas
Sol_K	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)	-25	25	Multiplicação	Todas
Sol_Z	Profundidade do solo (mm)	-25	25	Multiplicação (%)	Todas
Surlag	Coefficiente de retardo do escoamento superficial	0	10	Substituição direta	Sub-bacia
Timp	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve	0	1	Substituição direta	Sub- bacia
Tlaps	Taxa de lapso da temperatura (°C·km ⁻¹)	0	50	Substituição	Todas

Fonte: NEITSCH et al. (2005)

Conforme Arnold et al. (2009), o SWAT é sensível para mais de 100 variáveis de entrada, então para uma melhor performance da modelagem com o SWAT, o usuário deve calibrar e validar o modelo para os parâmetros existentes.

A calibração e validação foi realizada automaticamente pelo uso da ferramenta SWAT CUP 2012 versão 5.1.6, software desenvolvido por Abbaspour (2008). O SWAT CUP é um software de calibração de modelos SWAT. Este software realiza análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza (ABBASPOUR, 2008). O programa integra cinco algoritmos de calibração e análise de incerteza: *Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2)* (ABBASPOUR et al., 2004; ABBASPOUR et al., 2007); *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)* (BEVEN E BINLEY, 1992); *Parameter Solution (ParaSol)* (VAN GRIENSVEN et al., 2006); *Mark chain Monte Carlo (MCMC)* (KUCZERA et al., 1998); e *Particle Swarm Optimization (PSO)* (KENNEDY E EBERHART, 1995).

Nesse estudo foi utilizado o algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*). No SUFI-2 levam-se em conta para a análise de incerteza todas as suas fontes, como a incerteza em variáveis de entrada, o conceitual do modelo e as incertezas nos parâmetros e nos dados medidos. O grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas é quantificado por uma medida referida como o fator-p, que é a percentagem dos dados medidos delimitadas pela incerteza de predição de 95% (ABBASPOUR et al. 2008).

3.6 Calibração e Validação

A calibração e a validação do modelo, seguiu com a divisão da série temporal de vazão em duas partes. Na primeira parte da série temporal disponível é realizada a calibração do modelo onde os seus parâmetros de entrada poderão variar até que, por exemplo, a vazão simulada no exutório seja equivalente à observada pela rede de monitoramento existente na bacia hidrográfica. Após isso, a segunda parte da série temporal de dados é usada para a validação do modelo, onde todos os parâmetros determinados pela etapa de calibração não poderão ser alterados (ARNOLD et al., 2000). Esta etapa tem como objetivo mensurar a aderência dos resultados da simulação com um conjunto de dados independentes ao usado para calibrar os parâmetros.

Desse modo, foi selecionado o período entre 2004 e 2008 para o aquecimento e calibrar o modelo, e o período entre 2009 e 2013 para validar o modelo (Figura 12).

Depois é utilizada a média mensal do mesmo período usado na calibração, de forma que assegure que o modelo represente corretamente a variabilidade sazonal. Por último,

é realizado a validação mensal da série temporal de referência, em um período diferente do usado para a calibração (LI et al., 2009). Segundo Neitsch et al. (2005), a calibração do balanço hídrico e da vazão devem ser feitos para condições médias anuais, para depois refinar a calibração com dados mensais ou diários.

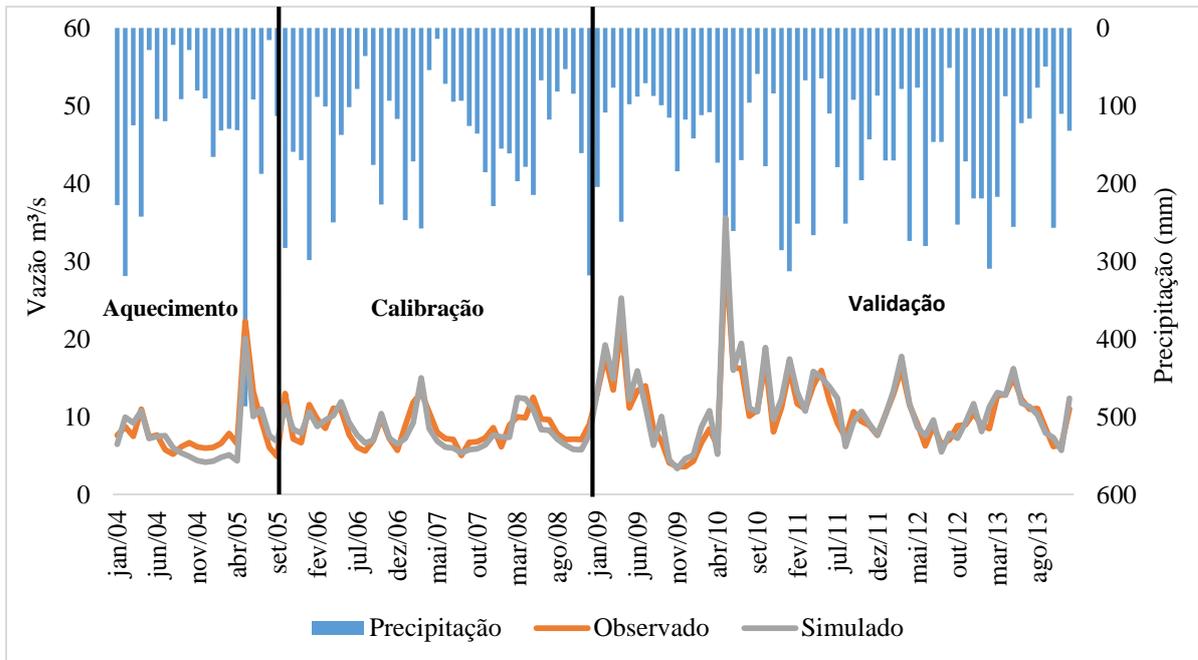


Figura 12 – Série dos dados de precipitação, vazão simulados e observados e os respectivos períodos utilizados para as etapas da modelagem hidrológica pelo modelo SWAT.

Observa-se, na Figura 12, a separação do período de 01/03/2004 a 31/12/2005 para o aquecimento do modelo. Na definição do período de aquecimento, levou-se em consideração a recomendação de Neitsch et al. (2005), de que o período de aquecimento seja de no mínimo um ano, para garantir que o ciclo hidrológico seja simulado corretamente. Além deste período de aquecimento, separou-se o período de 01/01/2006 a 31/12/2008 para a calibração do modelo e, o período de 01/01/2009 a 31/12/2013 para a validação do mesmo.

Em seguida, foi conduzida a validação do modelo com um conjunto de dados independentes daquele usado no processo de calibração. Foram utilizados os mesmos critérios de avaliação da qualidade da simulação adotados no período de calibração (COE e PBIAS) (Tabela 5). O banco de dados do modelo foi mantido conforme o estabelecido na calibração, não sendo alterado nenhum elemento nesta etapa do processamento do modelo.

Tabela 5 - Equações

COE - Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe	$\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$	(6)
PBIAS	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim} - \sum_{i=1}^n Q_{obs}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \right]$	(7)

Q_{obs} : vazão observada; Q_{sim} : vazão simulada pelo modelo; n : quantidade de dados na série de vazões observadas; e $Q_{obs}(t)$: vazão média observada do dia de referência do período simulado; $Q_{sim}(t)$: vazão média simulada do dia de referência do período simulado.

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados de medição. O índice varia entre -8 a 1, sendo que valores menores do que zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor do que a simulação pelo modelo, enquanto valores próximos a um indicam um ajuste ótimo. Segundo Moriasi et al. (2007), valores entre 0 e 1 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de performance do modelo, enquanto que valores menores que 0 indicam um desempenho inaceitável do modelo (Quadro 5).

Quadro 5 - Índices de eficiências

Classificação	COE	PBIAS (%)
Muito bom	$0,75 < COE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < COE \leq 0,75$	$\pm 1 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < COE \leq 0,60$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Insatisfatório	$COE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al. (2007)

A utilização do NSE para a avaliação do desempenho do modelo é recomendável por Moriasi et al. (2007) por duas razões principais: (1) é recomendado para o uso pela ASCE (1993) a Legates e McCabe (1999); e (2) é comumente utilizado em todo o mundo, o que fornece extensas informações dos valores reportados.

O coeficiente de determinação mostra o grau de colinearidade entre os valores observados e simulados, descrevendo a proporção da variância entre esses valores. O R^2 varia entre 0 e 1, em que valores mais próximos a 1 indicam menor variância do erro.

O PBIAS diz respeito ao percentual de viés das vazões simuladas pelo modelo em relação às observadas, ou seja, é uma medida da tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores que as observadas (Liew et al., 2007). Quanto mais próximo de zero for o

valor deste coeficiente melhor o modelo representará a realidade, além disso serve como indicativo se o modelo é pobre em representatividade (Moriasi et al., 2007).

Para complementar as análises foi avaliado também o coeficiente de determinação.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{obs\ med})(Q_{sim} - Q_{sim\ med}))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{obs\ med})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{sim\ med})^2} \quad (8)$$

em que $Q_{sim\ med}$ é a média dos valores simulados e $Q_{obs\ med}$ é a média dos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, e representa a proporção da variância total observada que é explicada pelo modelo, com maiores valores representando uma melhor performance do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Sensibilidade e Calibração

A análise de sensibilidade foi realizada com diversos parâmetros que o SWAT utiliza para os cálculos de estimativa de vazão, permitindo identificar quais parâmetros influenciam significativamente na dinâmica hidrológica. A escolha dos parâmetros foi feita com a ajuda do programa SWAT CUP, a qual determina quais parâmetros que mais influenciaram na simulação inicial e que podem ser utilizados como ponto de partida para a calibração do modelo. Quanto mais próximo de zero for o valor mais sensível é o parâmetro, o ranking de influência destas variáveis está ilustrado na Figura 13.

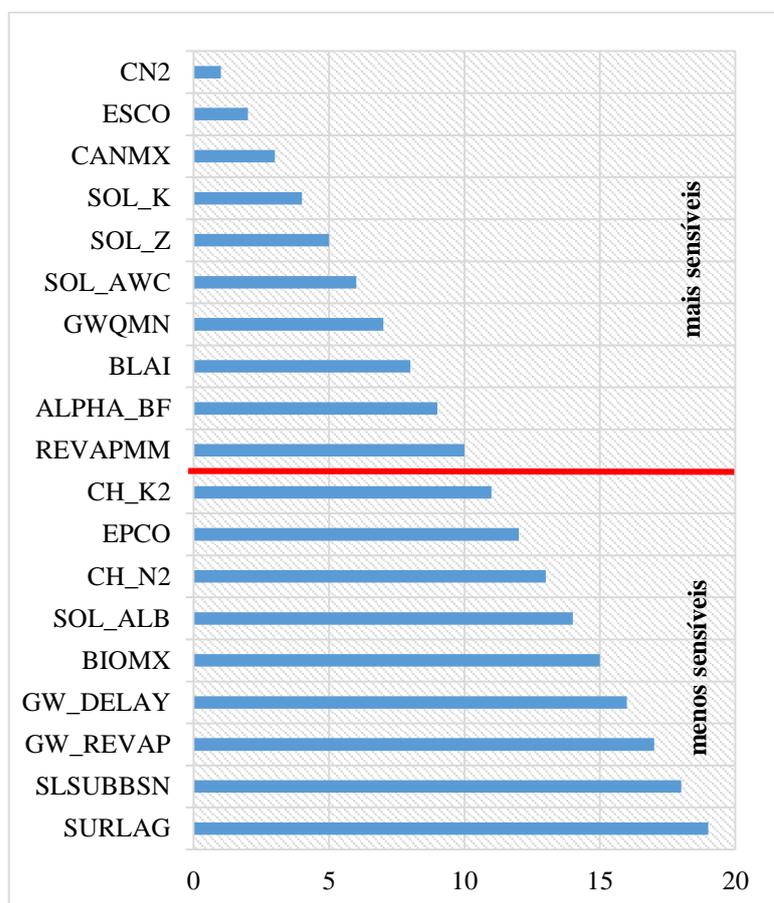


Figura 13 - Ranking dos parâmetros obtido com a análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Foi calibrado os dez parâmetros mais sensíveis, os demais valores dos parâmetros utilizou os fornecidos pelo próprio modelo (default). Quanto mais sensíveis forem os parâmetros, mais relevante se torna a necessidade de inseri-los no modelo quando possível ou atentar para

o ajuste de seus valores na fase da calibração. Os parâmetros Curva número com condição II de umidade (CN2), Fator de compensação de evaporação no solo (ESCO), Armazenamento máximo de água no dossel (CANMX), Condutividade hidráulica (SOL_K), Profundidade do solo (SOL_Z), Capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC), Profundidade do aquífero raso responsável pelo fluxo de retorno (GWQMN), Índice máximo de área foliar (BLAI), Constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF) e Limite de água no aquífero raso para ocorrer percolação (REVAPMN) foram considerados os dez mais sensíveis para a bacia.

O ajuste da condutividade hidráulica (SOL_K) teve relação direta com a resposta da vazão, uma vez que traduz a facilidade do solo de transmitir água, de forma que aumentando os valores para Sol_K, a vazão respondeu com o mesmo comportamento. Assim como observado por Kannan et al. (2007), o fluxo de base aumentou na bacia do Rio das Pedras quando a condutividade hidráulica foi aumentada em 20%, tendo como resposta diminuição do escoamento superficial e aumento das vazões mínimas.

Esse mesmo comportamento foi encontrado por Kannan et al. (2007), Cibir et al. (2010) e Caram (2011), que além de ajustarem os valores de SOL_K, acrescentaram o parâmetro SOL_AWC como função do aumento dos fluxos de base, já que este parâmetro representa a quantidade de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo.

Na bacia do Rio das Pedras, os ajustes para SOL_AWC foram de 35%. O aumento acima de 30% do valor inicial para capacidade de água disponível no solo teve comportamento inversamente proporcional ao fluxo de base observado na simulação da vazão nas sub-bacias calibradas. À medida que o parâmetro é ajustado com valores próximos a seus valores máximos, o modelo SWAT atribui características de saturação do solo, drenando a água para o perfil.

O grupo de parâmetros relacionados aos fluxos da zona saturada, GWQMN, REVAPMN e ALPHA_BF são de difícil determinação, sendo necessário estudos hidrogeológicos mais complexos para sua avaliação, os quais são inexistentes na área. No entanto, os valores ajustados não diferem, em ordem de grandeza, dos aplicados na literatura e em pesquisas que utilizaram o modelo SWAT na simulação de processos hidrológicos recentes no país.

4. 2 Simulação do Cenários

O resultado da simulação foi comparado aos dados da estação de vazão localizada próximo ao ponto exutório da bacia (estação ETA - Guarapuava), pelo mesmo período da simulação (01/01/2009 a 31/12/2013).

Cenário 1: Considerou-se o uso da terra atual.

Cenário 2: Considerou-se que a bacia ocupada pela floresta nativa.

4.2.1 Balanço Hídrico

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 14 podemos observar todos os valores médios anuais, de todas as etapas que fazem parte do ciclo hidrológico simulados pelo SWAT considerando o cenário do uso atual da terra.

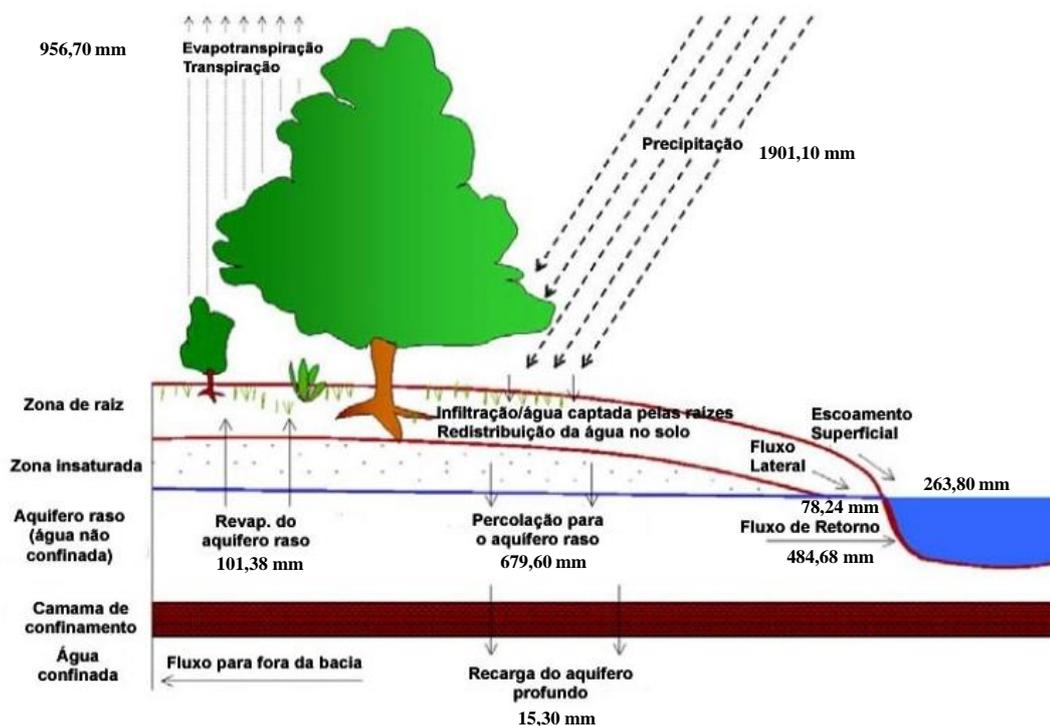


Figura 14 - Balanço hídrico (Cenário 1) simulado pelo SWAT para o período de 2009 a 2013.

Conforme pode ser observado, a evapotranspiração real compõe cerca de 956,70 mm, o escoamento superficial 263,80 mm, o fluxo lateral 78,13 mm, a percolação 602,47 mm, o fluxo de retorno 485,90 mm, a recarga para o aquífero profundo 15,30 e ascensão capilar do aquífero raso 101,27 mm. A precipitação média anual de cerca de 1901,10 mm, a evapotranspiração real é equivalente a 50,3 % do total de chuva que chega a bacia, concordando com os resultados obtidos por Cunha et al., (2011) para esse estudo que também foi na realizado bacia do Rio das Pedras, onde a precipitação média anual encontrada foi cerca de 1880,4 mm e a evapotranspiração real cerca 960,37 equivalendo cerca de 51,1 % do total de chuva.

Já o cenário mata nativa, apresentou decréscimo na vazão média, em relação ao cenário atual, cerca de -14,9% (Figura 15), isso devido, principalmente, a maior quantidade de matéria orgânica e ao aumento da evapotranspiração.

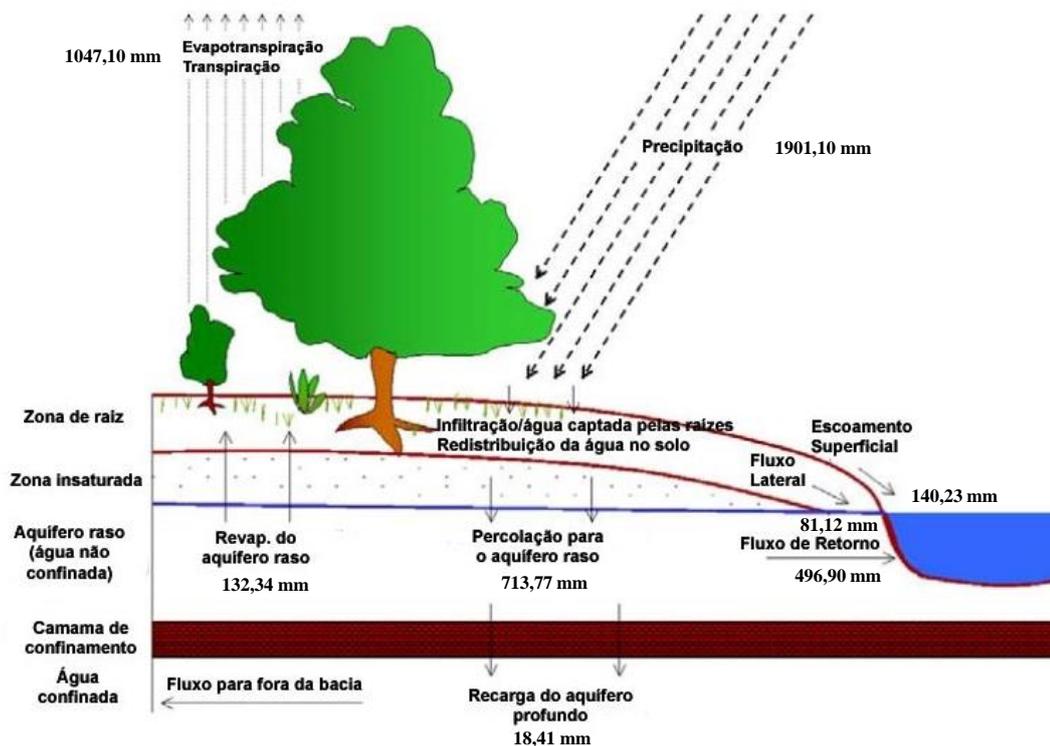


Figura 15 - Balanço hídrico (Cenário 2) simulado pelo SWAT para o período de 2009 a 2013.

O cenário de uso atual em relação com o cenário de mata nativa, pode ser observado, a evapotranspiração real teve um aumento de 8,63%, o escoamento superficial um decréscimo de 46,8 %, o fluxo lateral um aumento de 3,5 %, a percolação um aumento de 4,8 %, o fluxo de retorno um aumento de 2,4%, a recarga para o aquífero profundo um aumento de 16,9 % e ascensão capilar do aquífero raso um aumento de 23,4 %.

4.2.2 Simulação do volume de escoamento superficial

O resultado avaliado a partir da simulação com o Cenário 1 e Cenário 2 foi o escoamento superficial (mm), sendo influenciado pelo clima em conjunto com o uso da terra, solos e com a declividade do terreno. Com a intenção de destacar a forma com que as mudanças ocorreram nos cenários simulados, a Figura 16 e 17 mostra as diferenças observadas entre as simulações, para o escoamento superficial. É notada uma concentração dos maiores valores de escoamento na região a jusante, sendo tal fato atribuído às formas de ocupação características do solo, topografia e precipitação.

No cenário 1 os volumes de água gerados na forma de escoamento ao longo das bacias da alcançaram médias anuais que variam de 263,80 mm, destacando a que precipitação

média foi 1901,1 mm/anos, assim sendo que o escoamento foi 13,8% da precipitação. A sub-bacia 16, na qual ocorrem os valores mais acentuados de escoamento dentro toda a bacia hidrográfica, justificados pela cobertura do solo combinada com o tipo de relevo.

O cenário 2 apresentou média escoamento superficial de 140,23 mm anuais, a variação entre os cenários foi de 46,8 %. Isto foi observado por Hibbert (1967) e Bosch e Hewlett (1982). Esta verificação deve estar diretamente ligada com os valores adotados para a Curva Número (CN) pelo método de calibração automática, visto que, para o cenário 1 a CN igual a 74 e para o cenário a CN foi de 65.

Lembrando que o CN é um método baseado em dados da relação entre a intensidade de chuva, condições da superfície da terra, e volume do escoamento superficial sendo o valor de CN uma função do uso e ocupação da terra, das condições hidrológicas, do grupo hidrológico do solo e condições de umidade inicial do solo.

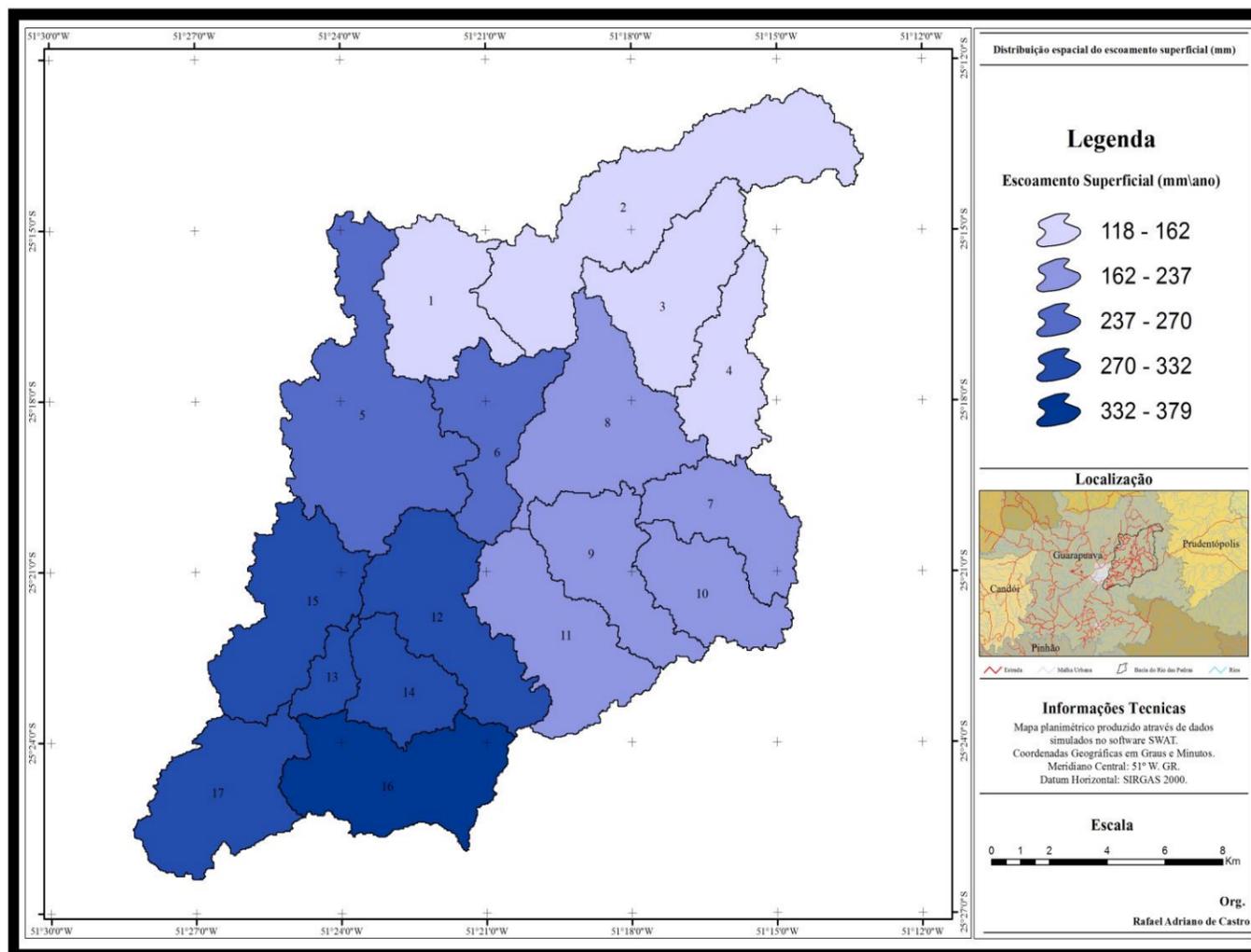


Figura 16 - Distribuição do escoamento superficial (mm) gerado ao longo da bacia durante o período de simulação, considerando o cenário 1.

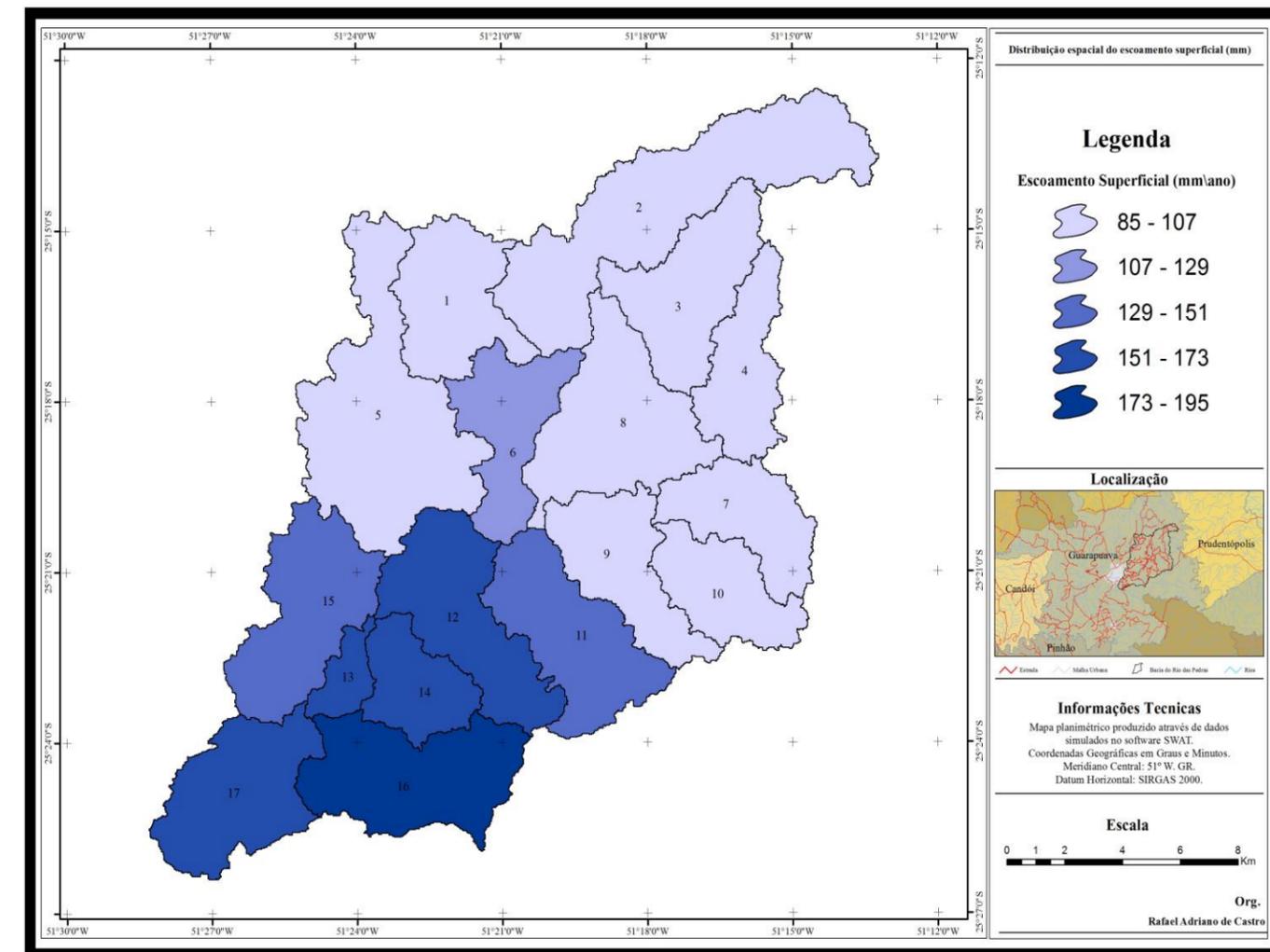


Figura 17 - Distribuição do escoamento superficial (mm) gerado ao longo da bacia durante o período de simulação, considerando o cenário 2.

4.2.3 Simulação da vazões (Cenário 1)

O Figura 18 mostra a vazão média mensal observada na estação (Guarapuava - ETA,) e a vazão média mensal simulada no exutório da bacia pelo modelo SWAT, no período entre 01/01/2009 e 31/12/2013.

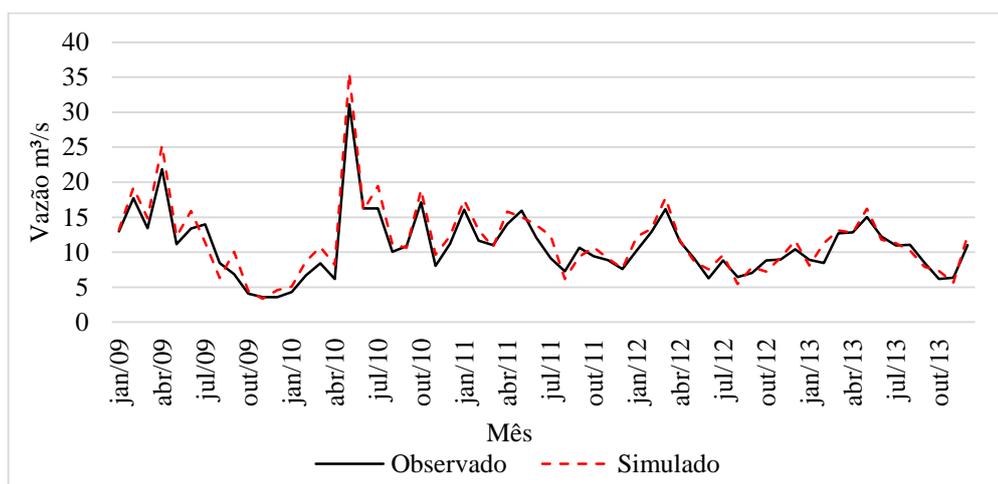


Figura 18 - Hidrograma comparativo com vazão observadas e simuladas.

Observa-se que o modelo SWAT simulou a vazão da bacia hidrográfica de maneira satisfatória. Os picos da vazão calculados pelo modelo mostram-se superiores aos observados.

A Tabela 6 apresenta o resultado da estatística de verificação da qualidade da simulação da vazão média mensal da vazão média mensal da bacia do Rio das Pedras. Os resultados da estatística de verificação foram satisfatórios.

Tabela 6 - Resultado final da estatística de verificação

Simulação/ Estatística	Resultado	Classificação
COE	0,69	Bom
PBIAS (%)	-0,5	Bom

Fonte: Moriasi et al. (2007)

O PBIAS indica a tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores do que a vazão que foi observada, de modo que valores positivos indicam que o viés do modelo tende a subestimar os resultados, enquanto valores negativos indicam que o viés tende a superestimar os resultados (GUPTA et al., 1999). Desse modo, observa-se através do PBIAS

(valor encontrado -05) que o modelo tende a superestimar a vazão simulada da bacia do Rio das Pedras.

Ao observar os resultados apresentados na Figura 19, verifica-se que a comparação dos valores de vazão mensal simulado com os observados foi satisfatória.

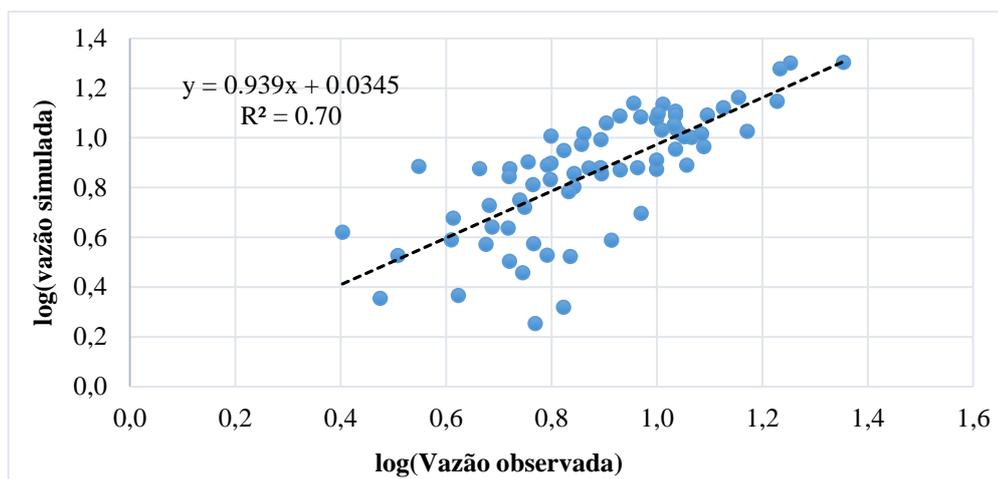


Figura 19 - Diagrama de dispersão entre a média mensal da vazão simulada e a média mensal da vazão observada.

Analisando o diagrama de dispersão, verifica-se que a série de vazão simulada comparada a série de vazão observada na estação fluviométrica apresentaram erros nas vazões máximas e mínimas, com tendência a subestimar as mínimas e superestimas os picos.

Comparando os dados por métodos estatísticos, e demonstram uma boa correlação linear entre os dados modelados e observados, com R^2 de 0,70.

A mesma interpretação é observado no diagrama de dispersão (Figura 20) constata-se o bom desempenho do modelo ao simular as vazões mensais durante os 5 anos de observação, pois o SWAT apresentou boa correlação entre a precipitação e a vazão simulada, evidenciando a adequada transferência de água. Com COE superior a 0,69 é possível avaliar como boa a simulação da vazão pelo modelo SWAT.

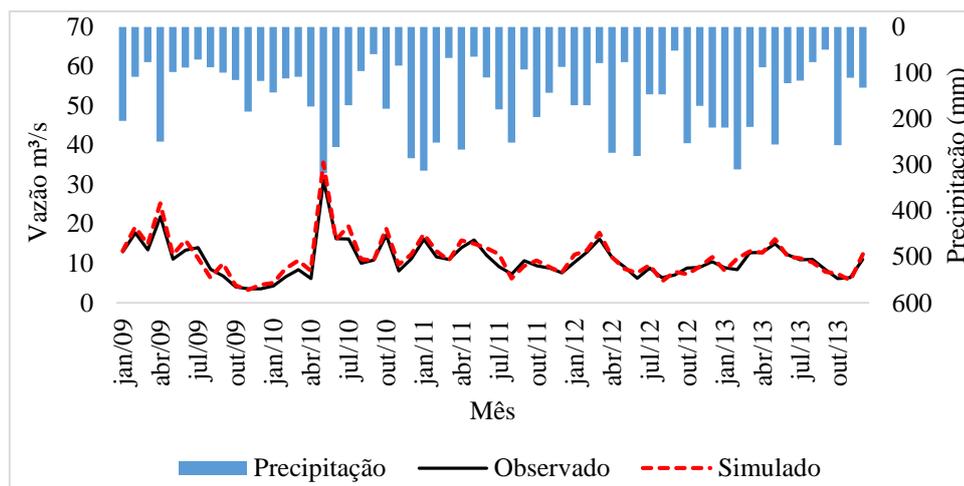


Figura 20 - Vazão mensal (observada e simulada) x precipitação.

Pode-se ressaltar que houve a subestimação da vazão simulada durante a maioria dos eventos de baixa magnitude, e a superestimação dos eventos com maior volume precipitado. Esses resultados podem ser justificados pelos elevados valores de condutividade hidráulica do solos que são inseridos no modelo. Pois, valores altos de condutividade hidráulica conduzem a altas taxas de infiltração, e conseqüentemente, reduzem o volume de água da superfície que chega ao canal.

Govender e 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, semelhante ao que ocorreu nas simulações da bacia do Rio da Pedras. Esse comportamento diferente do modelo para anos úmidos e secos pode estar vinculado à dificuldade do modelo simular a água disponível no solo durante os períodos úmidos.

Na análise das simulações de vazão líquida, também deve ser considerada a 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.

Segundo Moro (2005), 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.

4.2.4 Simulação da vazões (Cenário 2)

Para esse cenário o período simulado foi a partir do ano de 2009 até 2013, supondo não ter havido interferência na bacia com o passar do tempo (Figura 21).

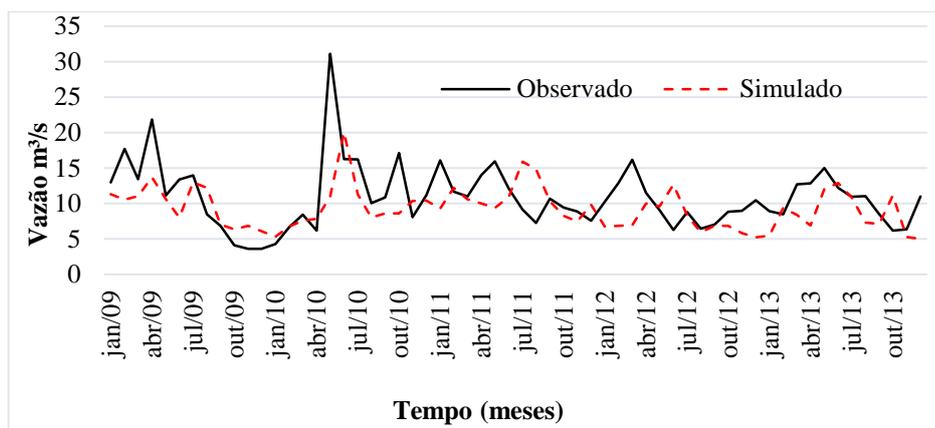


Figura 21 – Hidrograma comparativo com vazão observadas e simuladas.

O cenário floresta nativa, apresentou um decréscimo na vazão média, em relação ao cenário 1, cerca de -14,9 %, isso devido, principalmente, a maior quantidade de matéria orgânica e ao aumento da evapotranspiração. Com maior matéria orgânica, o solo fica melhor estruturado e aumenta a infiltração de água no solo. Por outro lado, com a maior cobertura proporcionada pela floresta, ocorre maior interceptação da precipitação pluvial e menos água chega ao solo.

Segundo Pruski, et al. (2001), quanto maior a evapotranspiração, menor será a umidade do solo e, conseqüentemente, maior será a taxa de infiltração e menor o escoamento superficial. Esse resultado obtido confirma com o trabalho desenvolvido por Lino (2009) na bacia Rio Negro (SC), onde foi observado que o maior impacto na redução do escoamento superficial foi obtido pela substituição do uso e cobertura atual da terra por floresta nativa. Garcia et al. (2006) na bacia do rio Corumbataí (SP), também obtiveram uma redução na vazão média para o cenário floresta nativa em relação ao cenário atual de uso da terra.

O mesmo resultado foi encontrado em Colischonn e Tucci (2001) ao simularem cinco cenários com alteração de uso e cobertura na bacia do rio Taquari-Antas, RS. No cenário com 100% da área da bacia coberta por floresta, os autores registraram redução de 8,11% na

vazão média, quase o triplo foi encontrado para a mesma situação simulada na bacia Rio da Pedras. A resposta hidrológica nas duas bacias foram as mesmas para aumento do percentual de áreas de floresta. A diferença nos resultados encontrados em Colischonn e Tucci (2001) pode estar relacionada à área da bacia em estudo, 26.000 km² para a bacia do rio Taquari-Antas contra 331 km² da bacia do Rio da Pedras. Concluindo que no cenário com 100% de cobertura de floresta houve redução nos níveis médios da vazão ao comparar com o simulado para a bacia com uso da terra atual.

4.2.5 Produção de Sedimentos (Cenário 1)

No cenário 1, representado na Figura 22 a maior quantidade de produção de sedimentos ocorreu nas sub-bacias 13,16 e 17 (4,70 a 5,81 t/ha/ano), com média de 29,03 % do uso das terras com pastagem. O solo predominante nas sub-bacias 13 e 17 é a associação entre LATOSSOLO BRUNO Distrófico típico com CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, álico (LBd2). Na sub-bacia 16 predomina a associação NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (RLd3). A declividade média das sub-bacias 13,16 e 17 varia entre 12 a 20%.

Os solos NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico se caracterizam por, possuem minerais primários e altos teores de silte até mesmo nos horizontes superficiais. Por possuírem alto teor de silte e a pouca profundidade, estes solos apresentam permeabilidade muito baixa. Já o CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico são solos pouco profundos a rasos, com pequena diferenciação de horizontes, ausência de acumulação de argila, textura franco-arenosa ou mais fina (EMBRAPA, 1999). A presença desses solos associada em locais com declividade alta, se tornam áreas altamente susceptíveis a erosão hídrica.

A menor quantidade de produção de sedimentos ocorreu nas sub-bacias 3,4,5, 7 e 8 (0,20 a 1,32 t/ha/ano), com média de 51,53 % do uso das terras com floresta. Ainda apresentam em média, 27,62 % nas áreas cobertas floresta em estágio inicial. O solo predominante nas sub-bacias 3,4 e 7 é a associação CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico típico + NEOSSOLO LITÓLICO Húmico típico (CHa6). Na sub-bacia 5 predomina a Associação NITOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (NXd2). Na sub-bacia 8 predomina a associação NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico + NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico (RLd13). A declividade média das sub-bacias 3,4,5 e 7 é de entre 6 a 12%.

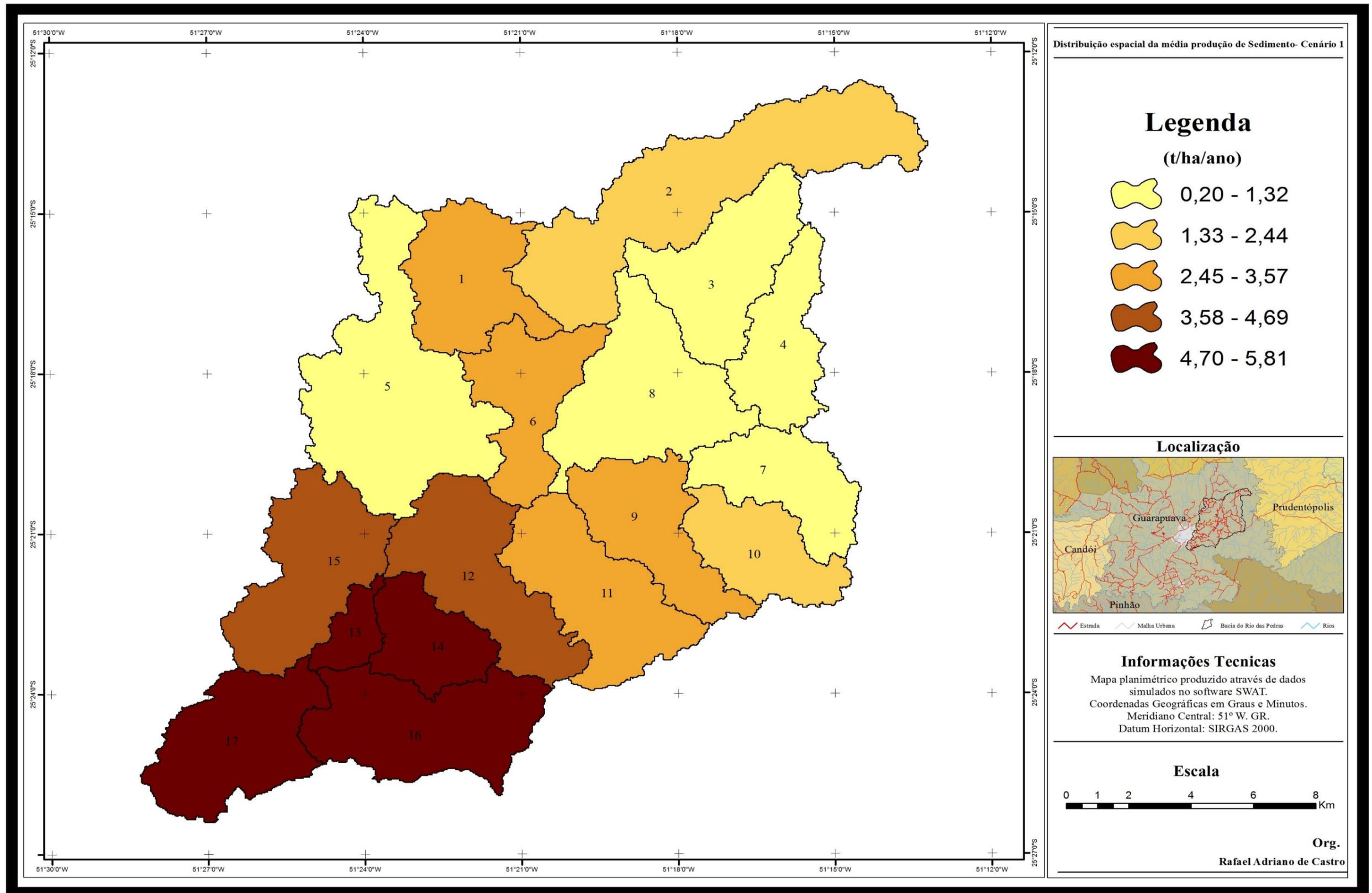


Figura 22 - Produção de Sedimentos (Cenário 1).

Sabe-se que os eventos erosivos os quais se manifestam em determinada área, sofrem influências de fatores como da precipitação, da variação espacial das ocorrências dos solos, da cobertura vegetal e da morfologia do terreno. Destes fenômenos, a precipitação tem influência direta na produção de sedimentos, no que diz respeito aos processos de infiltração e escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1989). Isso pode ser analisado no gráfico (Figura 23).

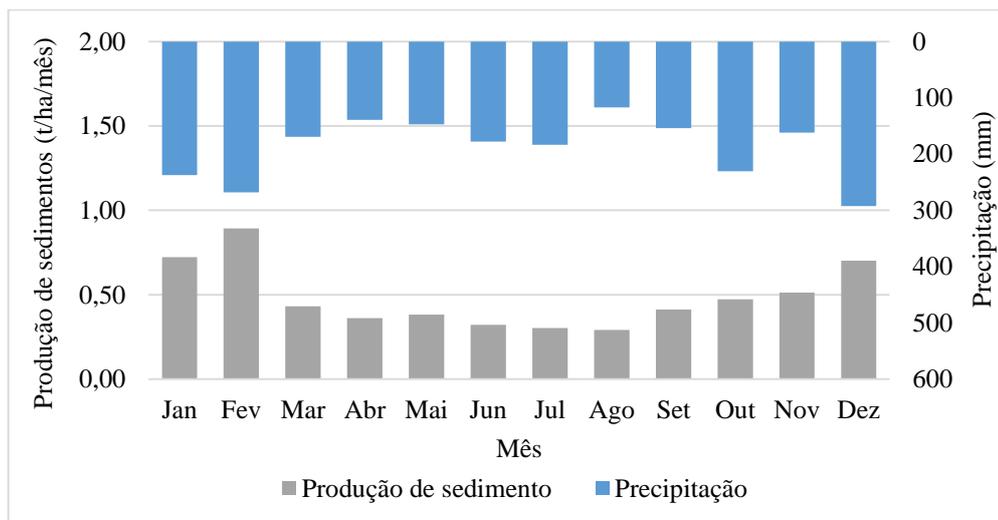


Figura 23 - Resultados da simulação de aporte de sedimentos e precipitação.

Conforme observado, o mês fevereiro que apresentou os maiores valores de produção de sedimentos, seguido por janeiro e dezembro. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de chuvas que ocorrem nesses meses. Os eventos erosivos que se manifestam em determinada área sofrem influências dos fenômenos da precipitação, da variação espacial das ocorrências dos solos, da cobertura vegetal e da morfologia do terreno.

No que se refere à precipitação que ocorreu durante os cinco anos de simulação, constatou-se que a precipitação média observada no 158,42 mm/mês. Como a precipitação tem influência direta sobre o escoamento superficial, resultando em maior probabilidade na produção de sedimentos, provavelmente está não seja a razão para a elevada taxa de sedimentos observada para os meses de fevereiro e janeiro e dezembro. O Figura 24 apresenta o diagrama de dispersão entre a simulação da média mensal de produção de sedimentos (t/ha/mês) e a média mensal da precipitação (mm) durante os cinco anos de estudo.

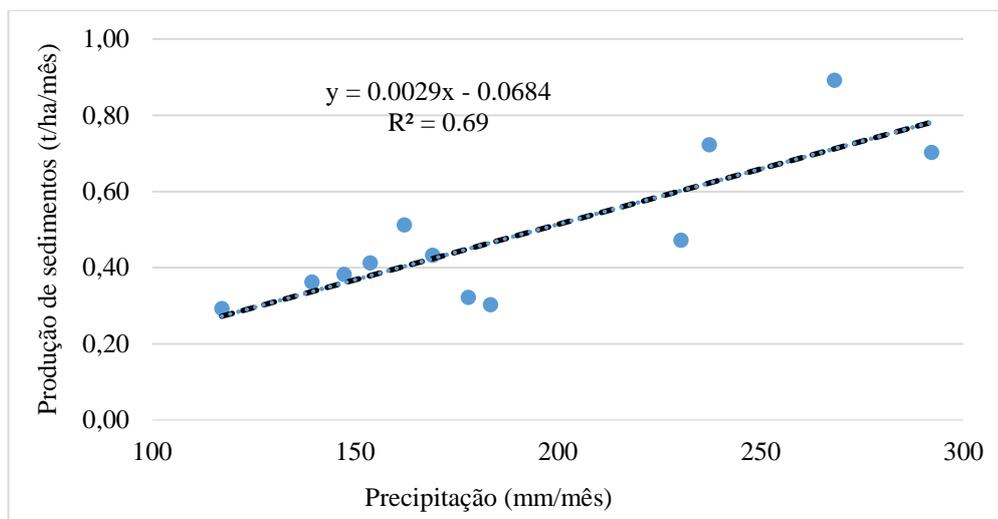


Figura 24 - Diagrama de dispersão entre a média mensal da produção de sedimentos simulada, e a média mensal da precipitação (mm).

Observa-se pelo diagrama de dispersão que a produção de sedimentos tem uma correlação positiva com a precipitação média mensal na bacia durante os cinco anos simulados.

Fator importante que nessa relação precipitação/sedimento é cobertura vegetal é que está desempenhando maior influência na bacia, já que a floresta nativa representa 45 % da área da bacia. As menores média de produção de sedimento foram observadas para o sistema sob floresta nativa, independentemente do solo e relevo, o que pode ser explicado pelos seguintes fenômenos, a interceptação das gotas de chuvas pelo dossel da floresta, que possui um estrato vertical muito diversificado, resultando em maior proteção do solo, a existência de uma rica camada de folhas, (serapilheira) e maiores teores de matéria orgânica condicionando agregados de maior estabilidade e, por consequência, melhor estruturação e maior permeabilidade pontos citados por Albuquerque et al. (2001).

Segundo Carvalho (2008), 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.

Um aspecto importante que pode ser destacado é que nas sub-bacias à montante da bacia do Rio das Pedras a produção de sedimentos foi menor, aumentando conforme cresce a declividade do terreno. Provavelmente o fator que pode estar mais intimamente ligado a isto é a intensificação do uso da terra nessas regiões. Entretanto, a conexão entre a geração, o

transporte e a produção de sedimentos é complexa pela combinação de fatores citados acima e também pela variação temporal da capacidade da rede de drenagem em transportar sedimentos.

Seguindo com o pensamento de acordo com Bertoni; Lombardi Neto (1989), conforme o tipo de cultura instalada e o manejo de solo e de restos culturais adotado, pode haver grande exposição da superfície do solo ao sabor da força erosiva das gotas da chuva. Ainda, com a formação de enxurrada e o solo exposto, há o carreamento de grandes quantidades de sedimentos para os cursos d'água, e em maior ou menor intensidade de acordo com características do solo, topografia, chuva, entre outras.

4.2.6 Produção de Sedimentos (Cenário 2)

O Cenário 2 visou representar a bacia sem alterações antrópicas, ou seja, toda a bacia estava coberta por floresta. Nesse cenário espera-se reduzida produção de sedimentos devido à proteção vegetal oferecida pela floresta juntamente com a inexistência de revolvimentos no solo, ficando a produção de sedimentos vinculada principalmente a erosão não-antrópica. Para esse cenário o período simulado foi a partir do ano de 2009 até 2013, supondo não ter havido interferência na bacia com o passar do tempo.

Observando os resultados de aporte de sedimentos para os diferentes cenários de uso e manejo da terra avaliados o aporte de sedimentos mostrou distinção entre os cenários comparando as médias anuais, no Cenário 1 (5,81 t/h/ano maior produção de sedimento entre as sub-bacias) foi aproximadamente 92% superior em comparação ao Cenário 2 (0,42 t/h/ano maior produção de sedimento entre as sub-bacias).

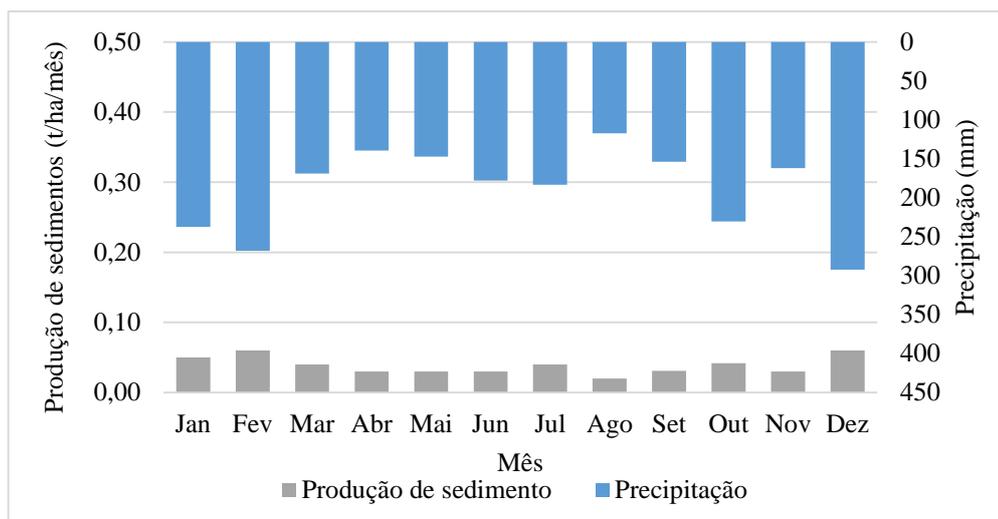


Figura 25 - Resultados da simulação de aporte de sedimentos e precipitação.

Ao observar os resultados apresentados na Figura 25, verifica-se que correlação entre valores de produção de sedimentos e precipitação anual. Comparando o cenário 1 com o cenário 2 é esperado que a vegetação nativa possa diminuir a erosão uma vez que, diretamente, altera os parâmetros de infiltração e especialmente a proteção dada ao solo contra o impacto direto das gotas de chuva e o aumento da rugosidade superficial. Segundo Larson (1997), a rugosidade superficial é um importante fator na redução do *runoff* e, conseqüentemente no transporte de sedimentos. A cobertura vegetal tem ação direta e efetiva na redução da erosão hídrica, devido á dissipação de energia cinética das gotas da chuva, diminuindo assim a desagregação das partículas do solo e o selamento superficial e aumenta a infiltração de água. A cobertura vegetal também reduz a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, a sua capacidade erosiva.

Naturalmente, essa diminuição não é uniforme e a visualização do padrão da produção de sedimentos nas sub-bacias mostra uma importante relação com o declive, isso pode ser notado na Figura 26. As simulações dos cenários indicaram que as variações no uso da terra podem diminuir ou aumentar a produção de sedimentos na bacia.

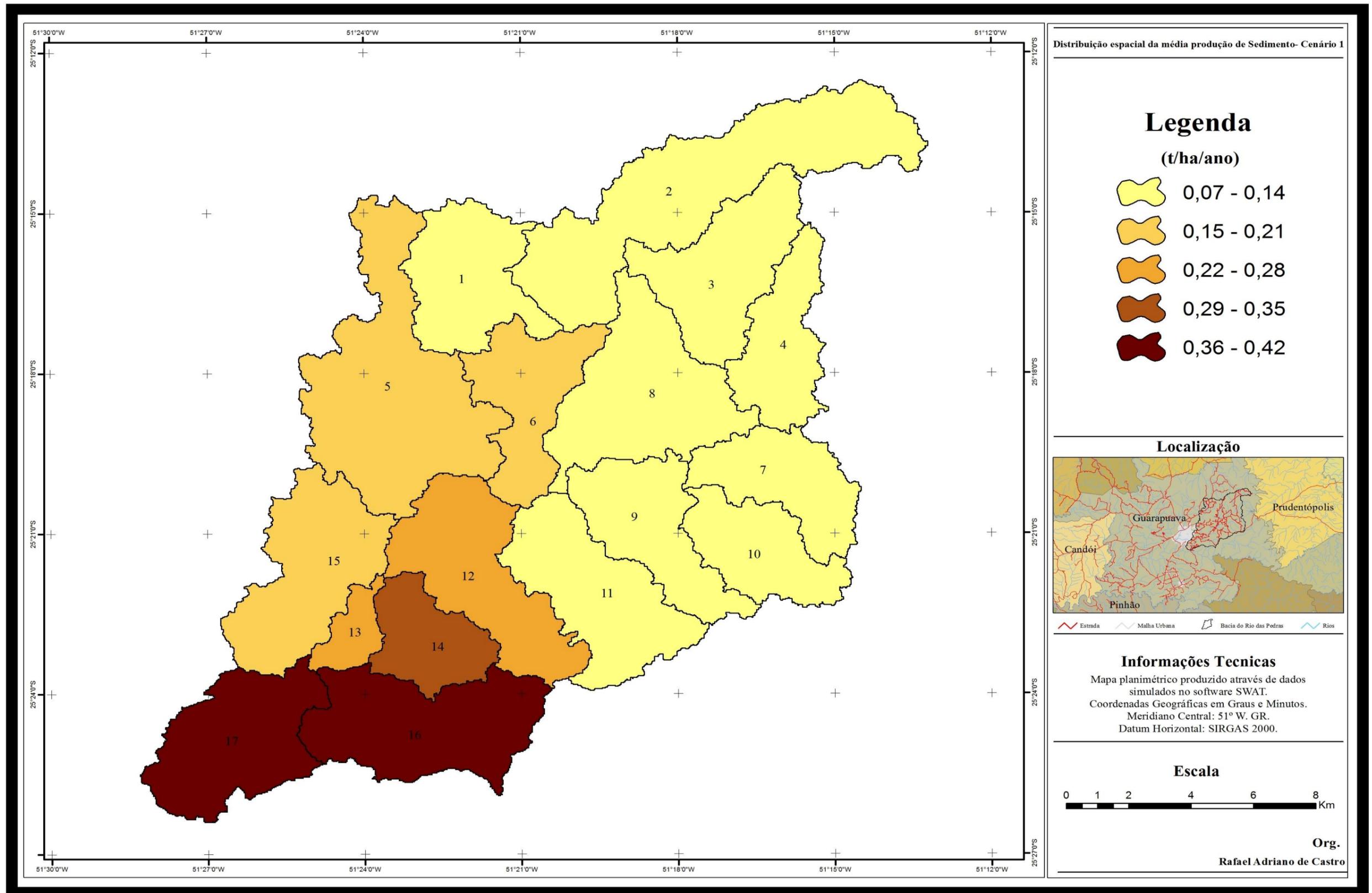


Figura 26 - Produção de Sedimentos (Cenário 2)

O conhecimento do efeito da variação no uso da terra sobre o movimento de sedimentos e água em bacias hidrográficas é muito importante para a tomada de decisões de manejo. Segundo Valério Filho (1994), a partir das informações obtidas com o mapa de potencial de erosão, é possível estipular quais seriam os tipos de coberturas recomendados conforme a classe de periculosidade.

Os resultados deste trabalho estão de acordo com Tucci e Clarke (1997), segundo os quais a erosão do solo é agravada quando sua superfície se torna desprotegida sofrendo a ação do impacto da gota de chuva que ocasiona selamento superficial do solo. Este selamento superficial do solo diminui drasticamente a infiltração e acelera o escoamento superficial; por outro lado, a capacidade de infiltração dos solos com floresta é alta, diminuindo o escoamento superficial, que é um dos maiores causadores de erosão hídrica.

Segundo Grunwald e Frede (1999), é importante notar que outros fatores como o histórico dos eventos erosivos, variação espacial dos solos na paisagem e a morfologia do sistema de drenagem, podem influenciar as diferenças entre a produção simulada e a observada. Além de que, para diferentes condições locais (uso da terra, clima, solos e relevo) e em diferentes escalas, os processos dominantes influenciando o transporte de sedimentos não são os mesmos.

5 CONCLUSÕES

Visando avaliar a mudança do uso da terra e os seus efeitos nos processos hidrogemorfológicos, o presente estudo simulou por meio do modelo hidrológico SWAT a hidrossedimentologia da bacia do Rio das Pedras – Guarapuava (PR).

As classes de uso e ocupação da terra demonstraram estar influenciando quase que diretamente os processos hidrossedimentológicos da bacia em estudo, visto que as sub-bacias ocupadas em sua grande maioria por florestas apresentaram as menores produções de sedimentos e as sub-bacias em que o uso da terra é do tipo pastagem a produção foi elevada. A topografia do terreno também apresentou influência sobre a geração de sedimentos, sendo encontrados nas sub-bacias mais planas os menores valores de perdas de solo. A interação entre as características desses dois fatores influenciam na produção de escoamento superficial, o qual se relaciona diretamente com a produção de sedimentos.

A influência do uso da terra nas variáveis hidrológicas. Dessa forma, ocorreu em média um acréscimo de 53,2 % no escoamento superficial, 12 vezes mais na produção média de sedimentos e na vazão média houve um acréscimo 14,9 % na comparação entre o cenário 1 (uso atual) para o cenário 2 (floresta nativa).

Em geral o comportamento fluviométrico da bacia, em resposta as mudanças de uso e cobertura da terra, apresentaram valores coerentes com os encontrados na bibliografia. As simulações de cenários auxiliaram na compreensão de como os processos hidrológicos analisados se comportariam, de acordo com a magnitude nas alterações nas coberturas da terra.

Com base no presente trabalho sugerem-se alguns estudos que podem ser desenvolvidos a fim de contribuir, com melhor compreensão, aos processos hidrossedimentológicos da área de estudo.

Ampliar a base de dados em relação ao período histórico de dados observados de vazão para a bacia do Rio da Pedras a fim de melhorar as perspectivas de calibração e verificação do modelo.

Recomenda-se detalhar as análises das propriedades físicas dos solos, além de melhor a resolução espacial do mapa de solos.

Estudar outros cenários, para estender a compreensão, dos processos hidrossedimentológicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C., JOHNSON, C.A., VAN GENUCHTEN, M.T. H. 2004. **Estimating uncertain flo and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure.** J. Vadouse Zone 3 (4), 1340–1352.

ABBASPOUR, K.C., YANG, J., MAXIMOV, I., SIBER, R., BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIST, J., SRINIVASAN, R., 2007. **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/ alpine Thur watershed using SWAT.** J. Hydrol. , 413–430.

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual.** Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95 p. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. Hidro Web: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 10 mar

ALLEN, R.G., M.E. JENSEN, J.L. WRIGHT, BURMAN, R.D. **Operational estimates of evapotranspiration.** Agron. J. 81:650-662. 1989.

ANDERSON, R. M.; KOREN, V. I.; REED, S. M. **Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates.** Journal of Hydrology, v. 320, p. 103-116, Mar. 2006.

ANTONELI, V; THOMAZ, E.L. **Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista, Guamiranga-PR.** Rev. Caminhos da Geografia, Uberlândia, v.8, n.21, p46-58, jun. 2007.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R S. e WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.** Journal of the American Water Resources Association, v.34, p.73-89, 1998.

ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Soil and water assessment tool input/output file documentation version 2009.** Disponível em: Acesso em 11 jan. de 2015.

ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin.** Journal of Hydrology, v.227, p. 21-40. 2000.

ASCE. **Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol.119, n°3, p.429-442, 1993.

BAGNOLD, R.A. **Bedload transport in natural rivers.** Water Resources Research, v.13, p.303-312, 1977.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT.** 2005. 132 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação.** Florianópolis: UFSC, 112 p. 1994.

BENNET, J.P. **Concepts of mathematical modelling of sediment yield.** Water Resources Research, Washington, v. 10, n. 3, p. 485-492. 1974.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 7. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355p.

BEVEN, K. 1989. **Changing ideas in hydrology the case of physically based models.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 105, p. 157-172.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling the primer.** Chichester: John Wiley e Sons Ltda. 360p. 2001.

BEVEN, K.J. AND BINLEY, A.M., **The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction,** Hydrological Processes, v. 6, p.279–298, 1992.

BOSCH, J. M. e HEWLETT, J. D. **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.** Journal of Hydrology, v. 55, p. 3-23, 1982.

CAMARGO FILHO, M. **Aspectos fundamentais da evolução geomorfológica cenozóica da bacia do rio Bananas - Guarapuava – PR.** 1997. 195p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 599 p. 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial: o canal fluvial**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial: o canal fluvial**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

CIBIN, R., et al. **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model**. Hydrological Processes, v. 24, n. p. 1133-1148, 2010.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 6 No. 1. 2001.

CUNHA, M. C.; OLIVEIRA, E. D.; THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. **Análise Temporal do Balanço Hídrico na Bacia do Rio das Pedras, Guarapuava, PR**. **Revista Brasileira de Geografia Física** p. 1013-1028. 2011.

EMBRAPA, IAPAR. **Levantamento de reconhecimento dos solos do centro-sul do Estado do Paraná (área 9)**. Brasília: EMBRAPA/IAPAR, 1979.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 412 p.

GBUREK, W.J.; SHARPLEY, A.N.; HEATHWAITE, L.; FOLMAR, G.J. **Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index**. *Journal of Environmental Quality*, v.29, p.130-144, 2000.

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

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. **Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model**. *Hydrological Processes*, Chichester, v. 19, n. 3, p. 683-692, 2005.

GRUNWALD S., Frede, H.G. **Using AGNPS in German watersheds**. *Catena* v.37 n.3 p. 319-328, 1999.

GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. da (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 394, 2004.

GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O. **Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration.** Journal of Hydrologic Eng, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

HARGREAVES, G.H. and Z.A. Samani. 1985. **Reference crop evapotranspiration from temperature.** Applied Engineering in Agriculture 1:96-99.

HIBBERT, A. R. **Forest treatment effects on water yields.** In: International Symposium on Forestry Hydrology, 1967, Oxford. Oxford: Pergamon, p. 527-543, 1967.

JENSEN, M.E., R.D. BURMAN, AND R.G. ALLEN (ED). **Evapotranspiration and irrigation water requirements.** ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y. 1990.

KANNAN, N., et al. **Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000.** Journal of Hydrology, v. 332, n. 3- 4, p. 456-466, 2007.

KENNEDY, M C; O'HAGAN, A, **BAYESIAN CALIBRATION OF MATHEMATICAL MODELS,** J. Roy. Statist. Soc., D63 (3), 425-450, 2001.

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SCRINIVASAN R. 1996. **Soil and Water Assessment Tool–SWAT.** USDA, Agricultural Research Service. 450p.

KUCZERA, G; PARENT, E, MONTE CARLO. **Assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm,** J. Hydrology, 211, 69-85, 1998.

LARSON, W.E.; LINDSTROM, M.J.; SCHUMACHER, T.E. **The role of severe storms in soil erosion: A problem needing consideration.** Journal of Soil and Water Conservation, v.52, n.2. p. 90-95, 1997.

LEGATES, D. R.; McCabe Jr., G. J. **Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydro climatic model validation.** Water Resources Research, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. **Impacts of land use change and climate variability on hydrology in a agricultural catchment on the Loess Plateu of China.** Journal of Hydrology, v. 377, p. 35-42, 2009.

LIEW, M. W. van; GARBRECHT, J. **Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT.** Journal of the American Water Resources Association, Herndon, v. 39, n. 4, p. 977-986, 2003.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. **Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds.** Journal of Hydrological Research, v.12, p.173-189, 2007.

LINO, J. L. F. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT.** 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LINSLEY, R.K. Jr.; FRANZINI, S. B. Engenharia de Recursos Hídricos. Tradução e adaptação de Luiz Américo Pastorino. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. **Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços.** Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas, Fundação Cargill. p. 99-124. 1989.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná.** Curitiba: J. Olympio, 1981.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. **Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 27, n. 4, p. 727-733, jul./ago. 2003.

MAIDMENT, D. R. **Hydrologic Information System Status Report** CUAHSI Universities Allied For Water Research. Ed. David R. Maidment. Version 1. 2005. p. 53. Disponível em: <[http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/CUAHSI/HISStatusSept15 .pdf](http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/CUAHSI/HISStatusSept15.pdf) >. Acesso em: 11 nov. 2015.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste Fluminense.** 2008. 196 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. **A review of erosion and sediment transport models.** Environmental Modelling e Software, Oxford, v. 18, p. 761-799. 2003.

MISHRA, A.; KAR, S.; SINGH, V. P. **Prioritizing structural management by quantifying the effect of land use and land cover on watershed runoff and sediment yield.** Water Resource Management, Ann Arbor, v. 21, n. 11, p. 1899-1913, Nov. 2007.

MONTEITH, J.L. **Evaporation and the environment.** p. 205-234. In The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K. 1965.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; LIEW, M.W.V.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** Watershed Simulations, v. 50, n.3, p. 885-900. 2007.

MORO, M. **A utilização da interface SWAT- SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos.** 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2005.

NARDY, A. J. R. **Geologia e petrologia do vulcanismo mesozóico da região central da Bacia do Paraná.** Tese de Doutorado IGCE-UNESP. Rio Claro, 1995. RIBEIRO, A, G. Paisagem e organização espacial na região de Palmas e Guarapuava. Tese de doutorado USP, São Paulo, 1999. (p.65-80)

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005.** Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, p. 541, 2005.

OLIVEIRA, M. Q. C. **Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joane sua repercussão na zona costeira.** 1999. 145 f. Dissertação (Mestrado e Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.

PENMAN, H.L. **Evaporation: An introductory survey.** Netherlands Journal of Agricultural Science 4:7-29. 1956.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, p.183, 1997.

PRIESTLEY, C.H.B. and R.J. Taylor. **On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters.** Mon. Weather. Rev. 100 p.81-92. 1972.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. **Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.301-307, 2001.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. Revista do Departamento de Geografia. n.8, p.63-74. 1994.

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. Revista do Departamento de Geografia. n.8, p.63-74. 1994.

SANGREY, D.A., K.O. HARROP-WILLIAMS, AND J.A. KLAIBER. **Predicting groundwater response to precipitation**. ASCE J. Geotech. Eng. v.110 (7) p.957-975. 1984.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. **Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions**. Soil Science Society of America Journal, v.70, p.1569-1578. 2006.

SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. **Erosion/productivity impact calculator. Model documentation**. Washington: USDA ARS Technical, p. 235, 1990.

SILVA, A. M., SCHULZ, H. E., CAMARGO, P. B. (2003). **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. Editora RIMA. São Carlos, SP, p.140, 2003.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. **Mathematical modeling of watershed hydrology**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS), **Hydrology**. In: National engineering handbook. Section 4. Washington: USDA, p 101- 1023, 1972.

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. **Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model**. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, Dec. 2000.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. **Aspectos Climáticos de Guarapuava-PR. Guarapuava: UNICENTRO, 2003.**

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review v.38 p.55-94, 1948.

TRATZ, E. B. **As rochas vulcânicas da província magmática do Paraná, suas características de relevo e sua utilização como recurso mineral no município de**

Guarapuava - PR. Dissertação (mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2009.

TUCCI, C. E. **Apreciação do plano nacional de recursos hídricos e visão prospectiva dos programas e ações.** Documento de apoio às ações de planejamento da Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, p.53, 2001.

TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. **Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento:** Revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, nº 1, p. 135-52, 1997.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia – 1ª ed.** Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, p. 943, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, p.678, 2005.

TUCCI, C. E. M.; MACHADO, E. **Concepção do Controle de Enchentes na Região Metropolitana de Curitiba.** In: Tucci, C. E. M.; Porto, R. L.; Barros, M. T. Drenagem urbana: Gerenciamento Simulação e Controle. Porto Alegre: Ed UFRGS; ABRH, p 27-37, 1997.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA, T.; RODRÍGUEZ, S. L. **Gerenciamento e Recuperação das Bacias Hidrográficas dos Rios Itaqueri e do Lobo e da Represa Carlos Botelho (Lobo-Broa).** IIE, IIEGA, PROAQUA, ELEKTRO, 2003.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.** 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VAN GRIENSVEN, A., MEIXNER, T., GRUNWALD, S., BISHOP, T., DILUZIO, M., AND SRINIVASAN, R. (2006). **A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models.** Journal of Hydrology, 324(1-4), 10-23.

VALÉRIO FILHO, M. V. **Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas.** In: PEREIRA, V. P.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Solos altamente suscetíveis a erosão. Jaboticabal: UNESP, FCAV; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, cap.5, p. 223-242, 1994.

VENETIS, C. **A study of the recession of unconfined aquifers.** Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. 14(4): 119-125, 1969.

VILLELA, S. M. e MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WALLING, D. E. **The sediment delivery problem**. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 65, p. 209- 237, 1983.

WILLIAMS, J.R. **Sediment routing for agricultural watersheds**. Water Resources Bulletin, Herndon, v. 11, n. 5, p. 965-974, 1975.

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

7 APÊNDICE - Caracterização e equacionamento fase terrestre do SWAT

A concepção do ciclo hidrológico utilizada no SWAT considera que quando a chuva alcança a superfície terrestre, parte dela é retida pela vegetação. Da parte remanescente, um percentual infiltra e outra escoar pela superfície. A parte que infiltra e outra escoar pela superfície. A parte que infiltra será redistribuída pelo perfil do solo, podendo ser utilizada pela vegetação, evapotranspirar, contribuir com o fluxo lateral (escoamento subsuperficial), percolar para as camadas inferiores do solo ou, ainda, ser armazenada no aquífero, pode fluir para o rio, permanecer num aquífero. A água estocada no aquífero pode fluir para o rio, permanecer no aquífero profundo ou evaporar (SILVA, 2010).

7.1.1 Intercepção

O dossel das plantas pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração. Quando a chuva cai, a intercepção pelas plantas reduz a energia erosiva das gotas e armazena uma parte da precipitação no dossel.

A influência que o dossel exerce sobre esses processos, é uma função da densidade da cobertura vegetal e da morfologia das espécies de plantas. Ao calcular o escoamento superficial, o método SCS curva número concentra a intercepção no dossel das plantas, em termos de abstrações iniciais. Essa variável inclui também, o armazenamento superficial e infiltração antes do escoamento, e é estimado como 20% do valor do parâmetro de retenção para um determinado dia.

Quando a equação de infiltração Green e Ampt é usada para calcular o escoamento superficial e infiltração, a intercepção de chuva pelo dossel das plantas é calculada separadamente.

O SWAT permite que a quantidade máxima de água que pode ser mantida no armazenamento pelo dossel varia diariamente em função do índice de área foliar:

$$can_{day} = can_{day} \times \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (9)$$

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

Quando a precipitação acontece em um determinado dia, o armazenamento do dossel é preenchido antes da água chegar ao solo:

$$R_{int}(f) = R_{int} + R_{day}' \text{ e } R_{day} = 0 \quad (10)$$

$$\text{quando } R_{day}' = can_{day} - R_{int}(i) \quad (11)$$

$$R_{int}(f) = can_{day} \text{ e } R_{day} = R_{day}' - (can_{day} - R_{int}(i)) \quad (12)$$

$$\text{quando } R_{day}' > can_{day} - R_{int}(i) \quad (13)$$

em que, $R_{int}(i)$ é a quantidade inicial de água livre mantida no dossel em um determinado dia (mm), $R_{int}(f)$ é a quantidade final de água livre mantida no dossel em um determinado dia (mm), R_{day}' é a quantidade de chuva num determinado dia antes da interceptação do dossel ser removida (mm), R_{day} é a quantidade de chuva num determinado dia, que atinge a superfície do solo (mm), e can_{day} é a quantidade máxima de água que pode ser mantida no dossel em um determinado dia (mm).

7.1.2 Evapotranspiração

Evapotranspiração é um termo que inclui todos os processos pelos quais a água na superfície do solo é convertida em vapor de água. Inclui a evaporação a partir do dossel das plantas, a transpiração, a sublimação da neve e a evaporação do solo. A evapotranspiração é o principal mecanismo pelo qual a água é removida de uma bacia. Aproximadamente 62% da precipitação que cai sobre os continentes é evapotranspirada. A evapotranspiração excede o escoamento na maioria das bacias hidrográficas e em todos os continentes, exceto na Antártida

(Dingman, 1994). O modelo SWAT calcula a quantidade de água interceptada em função do Índice de área foliar, através da seguinte equação:

$$\text{can}_{\text{dia}} = \text{can}_{\text{mx}} \times \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{mx}}} \quad (14)$$

Onde:

can_{dia} : é o máximo de água que pode ser armazenada em um determinado dia (mm H₂O);

can_{mx} : é a quantidade de água que pode ser interceptada quando a copa está completamente desenvolvida;

LAI: é o índice de área foliar em um determinado dia, e

LAI_{mx} : é o valor máximo do índice de área foliar para a, respectiva planta.

Com o cálculo do can_{dia} o modelo SWAT consegue determinar o quanto de água chegará ao solo. Além disso, no método SCS Curva-Número a interceptação é generalizada através do termo da equação que se refere às abstrações iniciais, o que torna importante o cálculo do can_{dia} .

7.1.3 Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração potencial (PET) é um conceito originalmente introduzido por Thornthwaite (1948), definido pelo autor como a evapotranspiração que iria ocorrer a partir de uma área coberta uniformemente com uma vegetação que tem acesso ilimitado de água no solo e que não foi exposta aos efeitos de armazenamento de calor e advecção.

Como a taxa de evapotranspiração é fortemente influenciada por um número de características da superfície vegetativas, Penman (1956) redefiniu a PET como "a quantidade de água transpirada por uma cultura verde, de altura pequena e uniforme, com o solo completamente sombreado e sem escassez de água". Pesquisadores, mais tarde (Jensen et al., 1990) sugeriram que a alfafa, a uma altura de 30 cm a 50 cm pode ser a escolha mais apropriada (Neitsch et al., 2009). Vários métodos foram desenvolvidos para estimar a PET. Três destes métodos têm sido incorporados no SWAT: o método de Penman-Monteith (Monteith, 1965;

Allen et al., 1989.), O método de Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972) e o método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). O modelo também pode ler valores de PET em nível diário, se o usuário preferir aplicar um método de evapotranspiração potencial diferente e de certa forma mais apropriado para sua região de estudo.

Os três métodos de PET incluídos no SWAT variam na quantidade de dados de entrada necessários. O método de Penman-Monteith requer radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O método de Priestley-Taylor requer radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar. O método de Hargreaves requer apenas a temperatura do ar.

7.1.4 Evapotranspiração Real

Uma vez que a evapotranspiração potencial total é determinada, a evaporação real é calculada no modelo. O SWAT, primeiro evapora a chuva interceptada pelo dossel da planta. Em seguida, calcula a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo, utilizando uma abordagem semelhante à de Richtie (1972, apud Neitsch et al., 2009). A quantidade real de sublimação e evaporação do solo é então calculada.

7.1.5 Evaporação da chuva interceptada

Toda a água presente no dossel está prontamente disponível para a remoção por evapotranspiração. A quantidade de evapotranspiração real da chuva interceptada é especialmente significativa em florestas onde, em alguns casos, a evaporação da precipitação interceptada é maior do que a transpiração.

O SWAT remove o máximo de água possível do armazenamento dossel ao calcular a evaporação real. Se evapotranspiração potencial, E_0 , for menor que a quantidade de água interceptada no dossel, R_{int} , então:

$$E_a = E_{can} = E_0 \quad (15)$$

$$R_{int}(f) = R_{int}(i) - E_{can} \quad (16)$$

em que, E_a é a evapotranspiração real na bacia hidrográfica num determinado dia (mm), E_{can} é a evaporação da água interceptada pelo dossel das plantas num determinado dia (mm), E_0 é a evapotranspiração potencial num determinado dia (mm), $R_{int}(i)$ é a quantidade inicial de água interceptada pelo dossel das plantas num determinado dia (mm), e $R_{int}(f)$ é a quantidade final de água interceptada no dossel das plantas num determinado dia (mm).

Se a evapotranspiração potencial, E_0 for maior que a quantidade de água interceptada no dossel, R_{int} , então:

$$E_{can} = R_{int}(i) \quad (17)$$

$$R_{int}(f) = 0 \quad (18)$$

Uma vez que toda a água livre no dossel foi evaporada, a demanda de água por evaporação restante ($E'_0 = E_0 - E_{can}$) é dividida entre a vegetação e o solo.

7.1.6 Transpiração

Se a equação de Penman-Monteith é selecionada como o método de cálculo da evapotranspiração potencial, a transpiração é também calculada pelas equações utilizadas pelo método. Para os outros métodos, a transpiração é calculada por:

$$E_t = \frac{E'_0 \times LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI = 3.0 \quad (19)$$

$$E_t = E'_0 \quad LAI > 3.0 \quad (20)$$

em que, E_t é a transpiração máxima num dado dia (mm), E'_0 é a evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da precipitação interceptada (mm), e LAI é o índice de área foliar.

O valor para a transpiração calculada pelas equações 14 e 15 é a quantidade que ocorre em um determinado dia, quando a planta está crescendo em condições ideais. A quantidade real de transpiração pode ser menor do que é, devido à falta de água disponível no perfil do solo.

7.1.7 Sublimação e evaporação do solo

Em casos que há ocorrência de neve a sublimação é considerada. A quantidade de sublimação e evaporação do solo é afetada pelo grau de sombreamento. A quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo em um determinado dia é calculada por:

$$E_s = E'_0 \times cov_{sol} \quad (21)$$

em que, E_s é a evaporação/sublimação máxima num determinado dia (mm), E'_0 é a evapotranspiração potencial ajustada para a evaporação da precipitação interceptada (mm), e cov_{sol} é o índice de cobertura do solo. O índice de cobertura do solo é calculado por:

$$cov_{sol} = \exp(-5.0 \times 10^{-5} \times CV) \quad (22)$$

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

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

Uma vez que a quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo é calculada, o SWAT primeiro remove a água do bloco de neve para atender a demanda evaporativa. No entanto, quando existe uma demanda de evaporação da água do solo, o SWAT primeiro particiona a demanda evaporativa entre as diferentes camadas. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água a ser evaporada é:

$$E_{soil,z} = E''_s \times \frac{Z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \times z)} \quad (23)$$

em que, $E_{soil,z}$ é a demanda por evaporação na profundidade z (mm), E''_s é a evaporação de água máxima do solo num determinado dia (mm), e z é a profundidade abaixo da superfície.

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

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soilzu} \quad (24)$$

em que, $E_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm), $E_{soil,zl}$ é a demanda evaporativa do limite inferior da camada do solo, e E_{soilzu} é a demanda evaporativa do limite superior da camada do solo.

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

Um coeficiente foi incorporado na equação 23 para permitir que o usuário modifique a distribuição da profundidade utilizada para atender a demanda evaporativa do solo. A equação modificada é:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soilzu} \times esco \quad (25)$$

em que, $esco$ é o coeficiente de compensação da evaporação do solo. Soluções da equação para diferentes valores de $esco$ são plotados na Figura 27. Quando o valor de $esco$ é reduzido, o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa de níveis mais baixos.

Quando o teor de água de uma camada de solo está abaixo da capacidade de campo, a demanda por evaporação da camada é reduzida de acordo com as seguintes equações:

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \times \exp\left(\frac{2.5 \times (SW_{ly} - FC_{ly})}{FFC_{ly} - WP_{ly}}\right) \quad SW_{ly} < CF_{ly} \quad (26)$$

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} \quad SW_{ly} \geq CF_{ly} \quad (27)$$

em que, $E'_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa da camada ly ajustada para o conteúdo de água (mm), $E_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm), SW_{ly} é o conteúdo de água no solo na

camada ly (mm), FC_{ly} é o conteúdo de água na camada ly na capacidade de campo (mm), e WP_{ly} é o conteúdo de água na camada ly no ponto de murcha (mm).

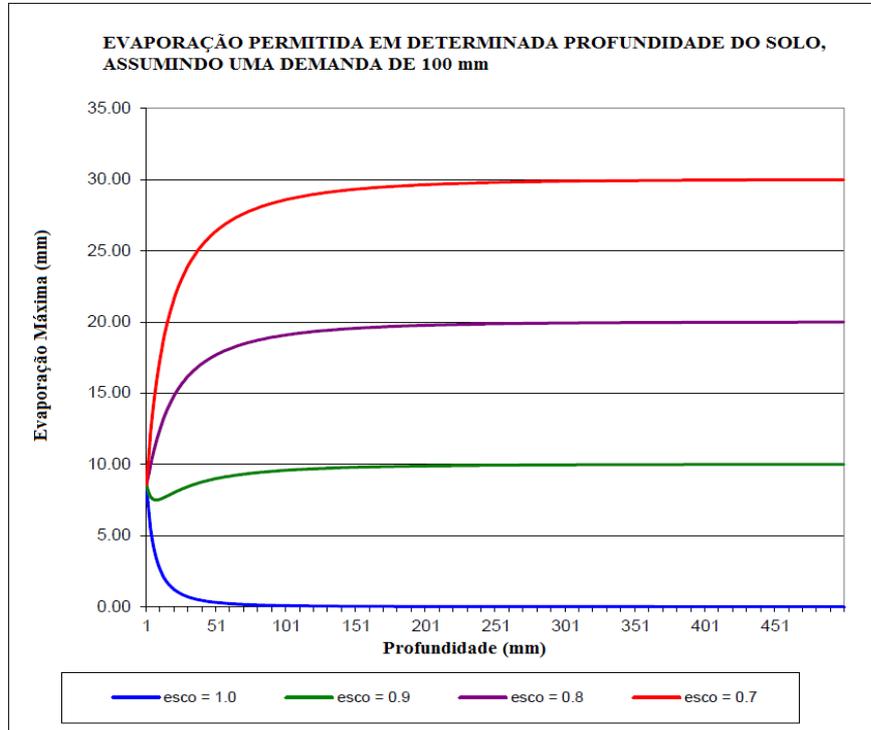


Figura 27 - Distribuição da demanda de evaporação do solo de acordo com profundidade (Adaptado de Neitsch et al., 2005).

Além de limitar a quantidade de água removida por evaporação em condições secas, o SWAT define um valor máximo de água que pode ser retirada a qualquer momento. Esse valor máximo é de 80% de água disponível para a planta em um determinado dia. O conteúdo de água disponível para a planta é definido como a diferença entre o teor total de água na camada de solo e o teor de água da camada de solo no ponto de murcha permanente (-1,5 MPa):

$$E'_{soil,ly} = \min (E''_{soil,ly} \times 0.8 (SW_{ly} - WP_{ly}) \quad (28)$$

em que, $E'_{soil,ly}$ é a quantidade de água removida da camada ly por evaporação (mm), $E''_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa da camada ly ajustada para o conteúdo de água no solo (mm), SW_{ly} é o conteúdo de água no solo na camada ly (mm), e WP_{ly} é o conteúdo de água no solo na camada ly no ponto de murcha (mm).

7.1.8 Percolação

A percolação dada como a transferência de água do solo para o reservatório de água subterrânea somente ocorre se a quantidade de água exceder a capacidade de campo para aquela camada e a camada inferior não estiver saturada. O volume de água disponível na camada do solo para a percolação é calculado por:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad (29)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se} \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (30)$$

em que, $SW_{ly,excess}$ é o volume de água drenável na camada de solo em um determinado dia (mm), SW_{ly} é a quantidade de água na camada do solo em um determinado dia (mm), FC_{ly} é a quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm). A equação utilizada para calcular a quantidade de água que percola para a camada seguinte é:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \times \left(1 - \exp \times \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (31)$$

em que, $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para a próxima camada em um determinado dia (mm), $SW_{ly,excess}$ 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).

No entanto, a percolação não é permitida quando:

$$SW_{ly+1} \leq FC_{ly+1} + 0.5 \times (SAT_{ly+1} - FC_{ly+1}) \quad (32)$$

em que, SW_{ly+1} é a quantidade de água na camada subjacente (mm), FC_{ly+1} é a quantidade de água relativa à capacidade de campo na camada de solo subjacente (mm), e SAT_{ly+1} é a quantidade de água na camada de solo subjacente quando completamente saturada (mm).

O tempo de propagação para a percolação é exclusivo para cada camada. É calculado por:

$$TT_{\text{perc}} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{\text{sat}}} \quad (33)$$

em que, TT_{perc} é o tempo de propagação para a percolação (hrs), SAT_{ly} é a quantidade de água na camada do solo quando completamente saturado (mm), FC_{ly} é a quantidade de água na camada do solo na capacidade de campo (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada na camada do solo (mm.h^{-1}).

A água que infiltra para fora da camada mais baixa do solo entra na zona vadosa, uma zona insaturada que fica entre o solo e a parte superior do aquífero.

7.1.9 Aquífero raso

O balanço no aquífero raso é dado pela equação:

$$aq_{\text{sh},i} = aq_{\text{sh},i-1} + w_{\text{rchr},\text{sh}} - Q_{\text{gw}} - w_{\text{revap}} - w_{\text{pump},\text{sh}} \quad (34)$$

em que, $aq_{\text{sh},i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{\text{sh},i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm), $w_{\text{rchr},\text{sh}}$ é a quantidade de recarga no aquífero raso no dia i (mm), Q_{gw} é o fluxo de águas subterrâneas, ou fluxo de base, para o canal principal no dia i (mm), w_{revap} é a quantidade de água em movimento na zona do solo em resposta às carências de água no dia i (mm), e $w_{\text{pump},\text{sh}}$ é a quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia i (mm).

7.1.10 Recarga

A água que se move passando da menor profundidade do perfil do solo por percolação ou pelo desvio do fluxo entra e flui através da zona vadosa antes de se tornar recarga do aquífero raso e/ou profundo. O atraso entre o momento em que a água sai do perfil do solo, e entra no aquífero raso irá depender da profundidade do lençol e das propriedades hidráulicas e de formações geológicas das zonas vadosa e subterrânea.

Uma função exponencial do decaimento proposto por Venetis (1969) e utilizado pelo Sangrey et al. (1984) em um modelo de resposta de precipitação/água subterrânea é utilizado no SWAT para calcular o tempo de atraso da recarga. A função de atraso acomoda situações em que a recarga para o aquífero não é instantânea, isto é, 1 dia ou menos. A recarga de ambos os aquíferos num dado dia é calculado por:

$$w_{\text{rchrg},i} = \left(1 - \exp\left[-\frac{1}{\delta_{\text{gw}}}\right]\right) \times w_{\text{seep}} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{\text{gw}}}\right] \times w_{\text{rchrg},i-1} \quad (35)$$

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

Da recarga total diária uma fração pode ser encaminhada para o aquífero raso e outra para o aquífero profundo. A quantidade de água que será desviada do aquífero raso para o aquífero profundo em um determinado dia é:

$$w_{\text{deep}} = \beta_{\text{deep}} \times w_{\text{rchrg}} \quad (36)$$

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

A quantidade de recarga para o aquífero raso é:

$$W_{\text{rchrg,sh}} = W_{\text{rchrg}} \times W_{\text{deep}} \quad (37)$$

em que, $w_{\text{rchrg,sh}}$ é a quantidade de recarga do aquífero raso no dia i (mm).

7.1.11 Fluxo de Base

O aquífero raso contribui para o fluxo de base do canal principal da sub-bacia. O fluxo de base é permitido apenas se a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder um valor limite especificado pelo modelador, $aq_{\text{shthr,q}}$.

A resposta do estado estacionário de percolação da água para recarga é dada de acordo com Hooghoudt, (1940):

$$Q_{\text{gw}} = \frac{800 \times K_{\text{sat}}}{L_{\text{gw}}^2} \times h_{\text{wtbl}} \quad (38)$$

em que, Q_{gw} é o fluxo de águas subterrâneas, ou fluxo de base, para o canal principal no dia i (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia), L_{gw}^2 é a distância da sub-bacia que divide o sistema de águas subterrâneas para o canal principal (m), e h_{wtbl} é a altura do lençol freático (m).

O SWAT utiliza um único modelo de crescimento da planta para simular todos os tipos de cobertura do solo e diferencia entre as plantas anuais e perenes. O modelo de crescimento de plantas é usado para avaliar a remoção de água e de nutrientes a partir da zona de raiz, a transpiração, a biomassa e o rendimento de produção.