

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PIXEL
A APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SWAT
NA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO GUAPORÉ, RS.**

TESE DE DOUTORADO

Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

**INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PIXEL NA
APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SWAT NA
BACIA HIDROGRAFICA DO RIO GUAPORÉ, RS.**

Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração Engenharia natural, manejo de cursos de água e bacias hidrográficas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

fensterseifer, sandro luciano barreto
INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PIXEL A APLICAÇÃO
DO MODELO DE SIMULAÇÃO SWAT NA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO
GUAPORÉ, RS. / sandro luciano barreto fensterseifer.-2014.
171 p.; 30cm

Orientador: José Miguel Reichert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2014

1. Simulador hidrológico 2. Resolução espacial pixel I.
Reichert, José Miguel II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado**

**INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PIXEL NA
APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SWAT NA BACIA
HIDROGRAFICA DO RIO GUAPORÉ, RS.**

elaborado por
Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert
(Presidente/Orientador)

Rudiney Soares Pereira Dr. (UFSM)

Alexandre Swarowski Phd. (UNIFRA)

Pedro Daniel Kemerich Dr. (UNIPAMPA)

Roberto Cassol Dr. (UFSM)

Santa Maria, 14 de agosto de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai Haimo Hartmut Fensterseifer (in memoriam) e a minha mãe Iglai Fensterseifer, exemplo de vida a quem devo muito do que aprendi em minha vida, meus grandes incentivadores para que eu concluísse esse estudo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, a meu pai Haimo Fensterseifer e minha mãe Iglai Fensterseifer, que sempre me incentivou, ao meu filho amado Lucas Fensterseifer minha irmã e irmão.

Agradeço a meu orientador José Miguel Reichert, pela paciência e confiança, e aos professores que me ajudaram a finalizar minha tese em especial, Afrânio Righes, Jean Minella, Galileu Buriol, e demais membros da banca de defesa, Alexandre Swarowski, Rudiney Soares Pereira, Pedro Daniel Kemerich, Roberto Cassol, e ao departamento de solos da Universidade Federal de Santa Maria.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PIXEL NA APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SWAT NA BACIA HIDROGRAFICA DO RIO GUAPORÉ, RS.

Autor: Sandro Luciano Barreto Fensterseifer
Orientador: José Miguel Reichert
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 14 de Agosto de 2014.

Sabe-se da necessidade de preservar os recursos ambientais, onde incluem-se os solos e a hidrologia. Estimativas da perda de água e solo por erosão são realizadas em diversos países, utilizando-se modelos empíricos ou conceituais, como o SWAT (Soil and Water Assessment Tool), utilizado para prever o impacto das alterações no uso e no manejo do solo, entre outros, sobre a perda de solo e a vazão de curso de água. Este modelo, através de suas rotinas, tem condições de simular e quantificar em uma bacia hidrográfica como ocorre a dinâmica de fluxo de água e sedimentos, sendo necessário o abastecimento de informações no formato de mapas e dados tabulados. Nesta tese estabeleceram-se dois objetivos: o primeiro identificar qual a resolução espacial mais adequada para simulações, comparando-se dados medidos a campo com dados simulados de vazão e produção de sedimentos. Para tanto, analisou-se como o produto imagem afetou o desempenho de simulação do aplicativo SWAT sem estar calibrado, alterando-se as respectivas resoluções espaciais das imagens em 10, 30, 50, 100 e 200 metros. Após realizaram-se três processos de análise para determinar qual resolução gerou melhores resultados de simulação, denominadas de análise de percentagem, estatística e regressão, concluindo-se que a imagem com 200 metros de resolução apresentou os melhores resultados de simulação de vazão líquida no canal e transporte de sedimentos sem a calibração do modelo. O segundo objetivo é realizar uma simulação para a bacia de Guaporé validar e calibrar o modelo para vazão líquida, analisando-se os resultados para o aporte de sedimentos com um período de 10 anos de dados. Realizada a simulação, executou-se análise de sensibilidade que indicou sete parâmetros como os mais sensíveis. Seguiu-se, então, para calibração, efetivando-se a mudança destes parâmetros de forma manual para vazão e posteriormente para produção de sedimentos. Utilizou-se, para analisar a eficiência da calibração, o coeficiente de eficiência. Conforme a bibliografia, este deverá manter valores acima de 0,50 para ser considerado como calibrado. Para os dados de vazão obtiveram-se valores médios para um intervalo de seis anos, analisados de 0, 578. Após a calibração, executou-se a validação do modelo utilizando-se um período de sete anos, alcançando-se para os dados de vazão um valor médio de COE de 0,68. O modelo apresentou um ano com valores abaixo do determinado pela bibliografia, sendo satisfatória a calibração e validação. Já para o transporte de sedimentos não foi possível calibrar o modelo e validar, pois o coeficiente de eficiência apresentou valores elevados, inferindo-se que as principais causas foram a simplificação da equação de perdas de solo que o simulador utiliza para fazer alguns cálculos, principalmente relacionados ao comprimento de rampa e declividade, e o tamanho da bacia. Além disso, deduzindo-se que os dados de sedimentos medidos apresentaram uma alta variabilidade dentro dos meses nos anos, o que dificultou o ajuste dos parâmetros. Concluiu-se que o processo de simulação é válido para análises e estabelecimento de medidas públicas de conservação e uso preventivo dos recursos ambientais, principalmente aqueles relacionados ao cultivo de solos, e que a resolução espacial mais adequada é de 200 metros para grandes bacias. Esta resolução não é, talvez, a realidade para pequenas bacias, devendo ser realizado estudos complementares.

Palavras-chaves: Simulador hidrológico, Resolução espacial, Produção de sedimentos.

ABSTRACT

Doctorate thesis
Program of Pós-Graduate in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria

APPLICATION OF SWAT MODEL SIMULATION IN GUAPORE-RS HYDROGRAPHIC BASIN WITH PATTERNS OF SPATIAL RESOLUTION AMENDING THE PIXEL

AUTHOR: Sandro Luciano Barreto Fensterseifer

ADVISER: José Miguel Reichert

DATE AND PLACE OF THE DEFENSE: SANTA MARIA, RS, Augst, 14TH, 2014

Today we know the need to preserve environmental resources, which include soils and hydrology. Estimates of water loss and soil erosion are held in different countries, using empirical or conceptual models such as SWAT (Soil and Water Assessment Tool), used to predict the impact of changes in the use and soil management, among others on soil loss and the flow of the watercourse. This model, through their routines, is able to simulate and quantify in a watershed as the dynamics of water flow and sediment occurs, the supply of information on the maps and tabular data format is required. This thesis set up two goals: first to identify the most appropriate spatial resolution for simulations, comparing the measured field data with simulated data flow and sediment yield. To this end, we analyzed how the product image affected the performance of the SWAT simulation application without being calibrated by changing their spatial resolutions of 10, 30, 50, 100 and 200 meters. After there were three analysis processes to determine which resolution gave better results of simulation, called analysis of percentage, and statistical regression, concluding that the image with 200 meter resolution showed the best results of simulation of liquid flow in the channel and without sediment transport model calibration. The second objective is to perform a simulation for basin Guapore validate and calibrate the model for liquid flow, analyzing the results for the sediment delivery with a period of 10 years of data. Performed the simulation is performed sensitivity analysis indicated that seven parameters as the most sensitive. Then ensued for calibration, effecting to change these parameters manually for flow and later to sediment production. Was used to analyze the efficiency calibration, the coefficient of efficiency. According to bibliography, this should keep values above 0.50 to be considered calibrated. For flow data were obtained for a range of average six years analyzed 0, 578 After calibration values, executed to validate the model using a seven-year period, reaching up to data an average flow of 0.68 COE. The model presented below one year with values determined by the bibliography, being satisfactory calibration and validation. As for the transport of sediment was not possible to calibrate and validate the model because the coefficient of efficiency showed high values, inferring that the main causes have been simplifying the soil loss equation uses the simulator to make some calculations, especially related to the length and steepness of slope, and basin size. Furthermore, by deducting the measured sediment data showed high variability within months of the years, making it difficult adjusting the parameters. It was concluded that the simulation process is valid for analysis and establishment of public conservation measures and preventive use of environmental resources, especially those related to the cultivation of land, and that the most appropriate spatial resolution of 200 meters for large basins. This resolution is not, perhaps, the reality for small basins, further studies should be performed.

Keywords: Hydrological Simulator, Spatial Resolution, Sediment yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura1- Ciclo hidrológico com suas peculiaridades, principais processos e a mensuração dos fluxos de evaporação, precipitação e drenagem.	26
Figura 2- Modelo de Interpolação Spline	31
Figura 3 - Esquema ilustrativo do manejo da informação na presente tese.	41
Figura 4- Localização da Bacia dentro do contexto estadual	43
Figura 5 - Localização das Estações de Coleta de dados e Rede Hidrológica da região.....	53
Figura 6 - Mapa Hipsométrico de Declividade da Bacia Guaporé.....	58
Figura 7- Rotina do Spline com a imagem gerada ao lado.....	59
Figura 8- Dados após execução das rotinas de interpolação das curvas de nível.....	60
Figura 9 - Área de uso idêntico com resposta espectral diferenciada.	64
Figura 10 - Diferentes tipos de uso do solo.	73
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo Bacia Guaporé.....	75
Figura 13 - Mapa de solos da Bacia do Guaporé-RS.	79
Figura 14 - Influência dos valores de surlag e tconc fração do escoamento superficial	88
Figura 15 - Distribuição espacial das estações.	96
Figura 16 - Tabela de inserção dos dados no Gerador Climático.....	102
Figura 17- Localização espacial das estações para coleta de dados.	105
Figura18 - Dados das estações, tabela master.	106
Figura 19 - Rotina de inserção dos dados de simulação no projeto.	107
Figura 20 - Rotina de inserção dos dados diários no projeto.....	107
Figura 21 - Bacia reclassificada de uso e ocupação do solo pelo Simulador SWAT.....	112
Figura 22 - Bacia com solos reclassificado pelo SWAT	113
Figura 23 - Declividades distribuída em classe pelo simulador.	114
Figura 24 - Distribuição das HRUs, projetadas sobre imagem satélite.	116
Figura 25 - Relação do fator L com a área de contribuição e o coeficiente, função da declividade segundo método Desmet e Govers (1996).	151
Figura 26- Relação do coeficiente x e as dimensões do pixel	152

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Aporte de sedimentos diária (ton).....	83
Equação 2 - Volume de escoamento superficial (mm H ₂ O ha ⁻¹).....	84
Equação 3- Parâmetro de retenção (adimensional).....	84
Equação 4 - Corresponde à Curva Número.....	85
Equação 5- Vazão de pico (m ³ s ⁻¹).....	85
Equação 6 - KUSLE, fator erodibilidade (0,013 ton m ² hr (m ³ - ton cm) ⁻¹).....	86
Equação 7- Parâmetro de tamanho de partícula (adimensional).....	86
Equação 8 - CUSLE, nm valor mínimo do fator de uso e manejo do solo.....	87
Equação 9 - CUSLE, média anual do fator C da cobertura vegetal considerada.....	87
Equação 10 - Fator topográfico.....	89
Equação 11 - Termo exponencial, m.....	89
Equação 12 - Declividade da unidade de resposta hidrológica (HRU).....	89
Equação 13 - Fator de fragmentação esparsa.....	89
Equação 14 - Quantidade de sedimento entregue no canal principal em um dia (ton).....	90
Equação 15 - Sedimento transportado pelo escoamento superficial e subterrâneo (ton).....	91
Equação 16 - Velocidade de pico (m s ⁻¹).....	92
Equação 17 - Fator de ajuste da vazão de pico.....	92
Equação 18 - Concentração máxima de sedimentos transportado pela água (ton m ⁻³).....	93
Equação 19 - Quantidade de sedimentos depositados no segmento do canal (ton).....	93
Equação 20 - Quantidade de sedimentos degradada (ton).....	93
Equação 21 - Quantidade de sedimentos em suspensão no canal (ton).....	94
Equação 22 - Quantidade de sedimentos transportada para fora do segmento (ton).....	94
Equação 23 - Estimativa de erodibilidade (KUSLE) em uma bacia hidrográfica.....	96
Equação 24 - Temperatura média máxima (TMPMX).....	100
Equação 25- Temperatura média mínima (TMPMN).....	101
Equação 26- Desvio padrão da máxima temperatura no mês. (TMPSTDMX).....	101
Equação 27- Desvio padrão da mínima temperatura no mês. (TMPSTDMN).....	101
Equação 28 - Precipitação (mm). (PCPMM).....	101
Equação 29 - Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹)(PCPSTD).....	102
Equação 30 - Coeficiente Skew para a precipitação diária no mês (PCPSKW).....	102

Equação 31 - Probabilidade de dia úmido seguido dia seco no mês. PR_W(1).....	102
Equação 32 - Probabilidade dia úmido seguido de outro dia úmido no mês PR_W(2).....	103
Equação 33 - Número médio de dias chuvosos no mês. (PCPD).....	103
Equação 34 - Precipitação máxima no período de 30 minutos (RAINHHMX).....	103
Equação 35 - Radiação solar média diária no mês ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) (SOLARAV).....	104
Equação 36 - Umidade relativa do ar (UR%).....	104
Equação 37 - Estimativa do valor da pressão de saturação de vapor.....	104
Equação 38 - Temperatura de ponto de orvalho (DEWPT).....	104
Equação 39 - Velocidade do vento médio diário no mês (m.s^{-1}). (WNDV).....	122
Equação 40 - Índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada.....	125
Equação 41 - Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe - COE.....	137
Equação 42 - Média aritmética mensal.....	138
Equação 43 - Grau de ajustamento da equação.....	138
Equação 44 - Erro padrão da estimativa.....	138
Equação 45 - Coeficiente de variação.....	152
Equação 46 - Fator de comprimento de rampa a partir da área de contribuição.....	152
Equação 47 - Cálculo da declividade Desmet & Govers	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros determinados em cada imagem raster após interpolação.....	60
Tabela 2- Parâmetros de calibragem na tomada das Imagens	62
Tabela 3 – Resultado da análise de qualidade de cada modelo de classificação	71
Tabela 4 - Valor médio de brilho de pixel por classe.	74
Tabela 5 - Uso e ocupação e respectivas áreas calculadas.....	76
Tabela 6 - Resultado do calculo solos e respectivas áreas calculadas	78
Tabela 7 - Valores fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno.....	85
Tabela 8 - Valores de fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno e faixas alternadas de diferentes culturas.....	85
Tabela 9 - Banco de dados de solo gerado no SWAT	94
Tabela 10 - Localização planialtimétrica das estações.	95
Tabela 11 - Parâmetros necessários no modelo SWAT.....	97
Tabela 12 - Dados climáticos calculados, Estação 289-522	102
Tabela 13 - Dados climáticos calculados estação 286-522.....	103
Tabela 14 - Dados climáticos calculados Estação 283-522	103
Tabela 15- Localização planialtimétrica das estações.	104
Tabela 16- Relação do tamanho da célula com o número de exultórios.....	109
Tabela 17 - Graus de declividade.....	114
Tabela 18 - Produção de sedimentos com as distintas resoluções relacionadas com dados coletados a campo ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$).	125
Tabela 19 - Desempenho das resoluções na simulação de sedimento sem calibração	127
Tabela 20 - Resultados da Simulação de Vazão Líquida com distintas Resoluções.	128
Tabela 21 - Desempenho das resoluções na simulação de vazão sem calibração	131
Tabela 22 - Determinação do coeficiente de eficiência (COE), dos dados de produção de sedimento, relacionado aos medidos.....	132
Tabela 23 - Análise do aporte de sedimentos médios anuais através das ferramentas estatísticas COE.	132
Tabela 24 - Determinação do coeficiente de eficiência (COE) dos dados de vazão líquida simulada, relacionado aos medidos:.....	133

Tabela 25 - Análise da vazão médios anuais através da ferramenta estatística COE.....	13133
Tabela 26 - Dados médios mensais de sedimentos produzidos com distintas resoluções.....	136
Tabela 27 - Análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes sedimentos simulados.....	136
Tabela 28 - Análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes chuva e sedimentos simulados	137
Tabela 29- Médias mensais de vazão m ³ / s, e chuvas em mm.	138
Tabela 30 - Análise de Regressão relacionando variável dependente vazão medida e variável independente vazão simulados.	139
Tabela 31 - Análise de Regressão relacionando variável dependente vazão medidos e variáveis independentes vazão simulados e chuvas	140
Tabela 32- Coeficiente de eficiência da regressão.	141
Tabela 33 - Relação dos parâmetros selecionados com seus níveis de sensibilidade.	141
Tabela 34 - Valores calibrados para Vazão seguidos do COE.	143
Tabela 35 - Valores calibrados para Produção de Sedimentos, seguidos do COE.....	144
Tabela 36- Coeficiente de eficiência determinado para dados de vazão líquida.	145
Tabela 37 - Análise de desempenho das distintas resoluções pelos três métodos avaliados.	146

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	21
1.2 Problema	23
1.3 Objetivos	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Bacias Experimentais, bacias hidrográficas, ciclo hidrológico	25
2.2 Erosão e Produção de Sedimentos, equação universal de perdas de solo	26
2.3 Sistema de Informação Geográfico, processos de interpolação	29
2.4 Modelagem de simulação hidrológica, modelo Swat, unidades de resposta hidrológica, calibração e validação	32
3. METODOLOGIA	40
3.1 Caracterização da área de estudo	42
3.2 Localização da Bacia Guaporé	42
3.3 Fatores Sócio Econômicos	44
3.4 Solos	46
3.5 Fatores Climáticos	50
3.6 Fatores da Hidrologia e Topografia	50
3.7 Fatores Vegetativos	51
3.8 Localizações dos pontos de Monitoramento dos dados (exultórios)	52
3.9 Coletas de campo Hidrosedimentológicas	54
3.10 Definição dos limites da bacia (Máscara de Recorte)	55
3.11 Mapa de Declividade	56
3.12 Mapa de Uso e ocupação do solo	61
3.13 Sobreposição da Máscara de Recorte ao banco de Imagens do Google	61
3.14 Mosaicagem das Imagens	62
3.15 Desmembramento da Imagem Mosaicada	63
3.16 Importação de imagens	64
3.17 Criação do banco de dados e elaboração do projeto	65
3.18 Georreferenciamento e mudança de projeção	65

3.19 Mapeamento de classes	66
3.19.1 Supervisionada	67
3.19.2 Não –Supervisionada.....	69
3.19.3 Determinação do desempenho dos algoritmos de classificação.....	69
3.19.4 Execução da rotina do Processo de Classificação	70
3.19.5 Alteração da Resolução Espacial da Imagem Classificada	76
3.20 Elaboração do Mapa de Solos	77
3.21 Dados planilhados para abastecimento do banco de dados	80
3.21.1 Parâmetros de solos	80
3.21.1.1 Aporte de Sedimentos.....	80
3.21.1.2 Retardo dos Sedimentos do Escoamento Superficial	87
3.21.1.3 Sedimentos do Escoamento Lateral e Subterrâneo	88
3.21.1.4 Propagação dos Sedimentos no Canal	89
3.21.1.5 Características físico hídricas dos solos	92
3.22 Fatores Climáticos inseridos no SWAT	95
3.23 Dados médios a serem preenchidos no simulador climático (WXGEN)	95
3.24 Dados diários para a simulação no modelo SWAT	104
3.25-Rotina de execução para introduzir dados climáticos no Projeto	106
3.26 Rotinas internas no SWAT	108
3.26.1 Inserção de dados para delimitação da bacia.....	108
3.26.2 Delimitação das HRU (Unidades de Resposta Hidrológicas)	110
3.26.3 Inserção dos dados Tabulados	116
3.26.4 Execução da Simulação	117
3.26.5 Análise de Sensibilidade do Modelo SWAT.....	118
3.26.6 Calibração e validação do modelo.....	121
4. RESULTADOS	124
4.1 Resultados do Objetivo 1	124
4.1.1 Análise com distintas Resoluções sem calibração, parâmetro de percentagem	125
4.1.1.1 Produção de sedimentos (Sed_Out).....	125
4.1.1.2 Vazão Líquida (Flow_Out).....	128
4.1.2 Análise com distinta resolução sem calibração, parâmetro da análise estatística	132
4.1.2.1 Produção de Sedimentos.....	132
4.1.2.2 Vazão Líquida.....	133
4.1.3 Análise das distintas resoluções sem calibração, parâmetro análise de regressão.	134

4.1.3.1	Produção de sedimentos.....	136
4.1.3.2	Vazão Líquida	138
4.1.3.3	Equação de Regressão Linear gerada para ajustamento de parâmetros.....	140
4.2	Resultados sobre Objetivo 2.....	141
4.2.1	Resultados sobre análise de sensibilidade.....	141
4.2.2	Resultados sobre Calibração	142
4.2.3	Resultados sobre Validação	144
5.	DISCUSSÕES	146
5.1	Discussão sobre Objetivo 1.....	146
5.1.1	Modelo Digital do terreno (MDT) com 200 metros de resolução.	147
5.1.2	Imagem de uso e ocupação do solo com 200 metros de resolução.....	152
5.1.3	Imagem de Solos com 200 metros de resolução	154
5.2	Discussão sobre Objetivo 2.....	155
5.2.1	Discussão sobre análise de sensibilidade.....	155
5.2.2	Discussão sobre Calibração	156
5.2.2.1	Calibração para produção de Sedimentos (SED_OUT).....	156
5.2.2.2	Calibração para Vazão Líquida (Flow_Out).....	159
5.2.3	Discussão sobre Validação.....	160
	CONCLUSÃO	162
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	164
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166

1. INTRODUÇÃO

Em um futuro adjacente, sabe-se que a escassez da água no planeta será a principal geradora de conflitos entre nações. Alguns estudiosos mais pessimistas preveem o início desta crise para os próximos cinquenta anos. Não há como passar despercebido o fato de que, em um planeta composto em sua maior parte por água, somente 0,6 % deste líquido precioso está apto ao consumo humano. Inclusive, projeta-se uma escassez crescente deste recurso natural para diversas regiões, gerando êxodos e conflitos constantes. Segundo dados da ONU, a estimativa atual é que entre 1,4 e 1,6 bilhões de pessoas estejam vivendo sob estresse hídrico, podendo este número ser duas ou quatro vezes maiores até o ano de 2050 (ARNELL, 2004 e ALCAMO et al. 2007).

Ainda agregada à contaminação das águas está à deterioração dos solos cujo uso e ocupação inadequada acelera este processo. O aumento da atividade antrópica também desencadeadora e aceleradora deste processo de erosão do solo é de igual forma responsável pelo escoamento superficial das águas.

A discussão da narrativa degradação ambiental tornou-se assunto frequente desde primórdios do século passado. A forma desenfreada e cataclísmica com a qual o homem continua utilizando os recursos naturais tem resultado em impactos negativos e, sobretudo, cumulativos sobre a natureza. Este fato estando implicitamente relacionado à apropriação e interação humana ao meio, desencadeia o processo de erosão hídrica que se constitui o início dos processos causadores do assoreamento dos cursos d'água, sendo esse episódio responsável por 80% dos problemas relacionados à qualidade da água em micro bacias (RANZINE; LIMA, 2002). Tem-se aqui o instrumento da sinergia atuando como fonte propagativa dos sedimentos entre meios distintos, demonstrando-se através da desagregação de partículas sólidas.

Receios com ambiência tornam-se cada vez mais contundentes na sociedade atual. Coexistência significa sobrevivência. A necessidade de mudança do sistema de interação com o meio é imprescindível, deve-se estabelecer uma simbiose entre os organismos envolvidos com a existência de obrigatoriedades nas relações, demonstradas através de alterações comportamentais visando com isto à preservação e perpetuação da espécie. Portanto, preconiza-se uma alteração de abordagem inter-relacional com o meio onde o comportamento

reativo, a partir de ações corretivas, deve ser substituído por processos pró-ativos. Ainda, coadjuvantes medidas mitigadoras e compensatórias devem ser substituídas por ações conservacionistas.

De acordo com Lal (1990), a erosão acelerada do solo tem destruído irreversivelmente 430 milhões de hectares de terras produtivas em diferentes países. Na América do Sul em torno de 123 milhões de hectares de terra são afetados pela erosão hídrica. No Estado de São Paulo, estima-se que 80% da área cultivada apresentem processos erosivos. Esta perda manifesta de solo, indubitavelmente, instiga as atividades agrícolas, causando assoreamento e contaminação dos cursos d'água, lagos e represas (PINTO, 1991; LAL, 1988). Há ainda que se mencionar o processo de ocupação desordenada gerando impactos de grande relevância no ciclo hidrológico e hidrossedimentológico em bacias hidrográficas (TUCCI, 1997). Além disso, impactos negativos produzidos pela ação antrópica que não podem ser revertidos e determinam consequências nas gerações atuais e futuras, indo de encontro às próprias legislações e preceitos de desenvolvimento sustentável.

Acredita-se que a gestão dos recursos hídricos deva ser orientada por técnicos com o objetivo de gerir e inventariar seu uso, controle e proteção e neste contexto a bacia hidrográfica deve ser a unidade básica de gestão (LANNA, 2006).

Seguindo esta linha de raciocínio, vale lembrar que processos erosivos representam um problema não somente pela perda de solo, mas também pela deposição destes e, sobretudo, pelos contaminantes que estes conduzem consigo deteriorando os recursos hídricos.

O uso e ocupação dos solos de maneira desenfreada, alavancado pelo incremento populacional que gera necessidades alimentícias, acarreta em uma constante degradação dos solos e contaminação dos recursos hídricos. Em consequência a erosão hídrica ocasiona alterações físico-químicas, gerando a perda da capacidade produtiva dos solos, e assoreamento dos rios e lagos, bem como, aumento de ocorrência dos transbordos de leitos de água, diminuição da vida útil de hidroelétricas e comprometimento dos reservatórios de água. Como efeitos nocivos à população e animais, os sedimentos erodidos trazem adsorvidos na sua estrutura nutrientes e agroquímicos para as várzeas e para os rios, afetando a qualidade da e aumentando custo de tratamento da água.

Estes sedimentos adsorvidos de químicos e efluentes domésticos sem tratamentos são considerados as principais fontes de contaminação dos recursos hídricos no Brasil. Contrariamente do que se imaginava as indústrias intrínsecas a processos legais de fiscalização e monitoradas com maior rigor e constância não são consideradas as principais

fontes de contaminação. Porém, sendo de fácil detecção, quando fontes de contaminação são de grande magnitude espacial.

O conhecimento da interlocação entre os sedimentos produzidos nas vertentes (erosão bruta), e a quantidade de sedimento que chega ao exutório da bacia é importante para a avaliação do impacto do uso das terras, na degradação das bacias, e para entendimento do movimento dos sedimentos associados com nutrientes e poluentes (WALLING, 1988).

A fim de se aplicar medidas de prevenção de erosão e de redução da transferência de poluentes deve-se compreender os processos que governam o fluxo de água no solo, isto quer dizer, processos erosivos, transferência de sedimentos e de poluentes aos mananciais hídricos, sejam eles superficiais ou subterrâneos. O desconhecimento desses processos comprometem a sustentabilidade agrícola e qualidade da água em bacias hidrográficas. O movimento da água no solo associado aos componentes do escoamento origina informações para uma análise precisa dos impactos da agricultura sobre os recursos hídricos.

Na produção de sedimentos e transporte de partículas em uma bacia têm-se dois fatores principais, ou seja, o escoamento superficial e processos erosivos causados por interferência das chuvas, influenciando de formas diferenciadas considerando-se sua intensidade e dimensão de gotas. Neste caso, deve-se considerar também o processo de transporte dos sedimentos da bacia vertente para a calha fluvial, e a propagação desses sedimentos na calha fluvial.

A simulação por computação expandiu-se em conjunto com o avanço da micro informática, um dos primeiros modelos de simulação foi o Projeto Manhattan, desenvolvido na Segunda Guerra Mundial, para modelar o processo de detonação nuclear. Há muitos tipos diferentes de simulação em computador, todavia, a característica comum a todas elas é a de a partir de uma amostra representativa de uma parte de um cenário geral, gerar resultados representativos para um todo, comprovados estatisticamente, pois a enumeração completa de todos os estados possíveis de um modelo tanto para simulações nucleares, como para escoamento superficial das águas é praticamente impossível, devido ao grande número de variáveis e incógnitas, conceito bem demonstrado pela Teoria do Caos.

Modelos de Simulação são empregados visando a estimativa da erosão e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Em grandes bacias, por exemplo, costuma-se direcionar para a determinação de estimativas de assoreamento de lagos e reservatórios e impactos sobre a qualidade da água. Já em pequenas bacias, objetiva-se o planejamento dos sistemas de uso e manejo de solos.

Existe uma gama bastante ampla de modelos apresentando como fator determinante de diferenciação, sua estrutura e quantidade de dados para sua calibração e validação.

No desenvolvimento de um modelo de produção e transporte de sedimentos deve-se trabalhar com variáveis espaciais e temporais dos atributos físicos do solo e da fisiografia da bacia. Em função da escala podem-se encontrar variações na topografia, usos do solo, características físicas e químicas de solos e variações nos processos hidrológicos, observando-se que quando se fala em escala, nos processos de cartografia digital, e sistemas de informação geográfica, entende-se que a resolução espacial do pixel é um fator preponderante na qualidade do modelo de simulação.

O desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem a produção de sedimentos e poluentes na bacia deve ser baseado em estudos detalhados dos fatores interferentes, em dados de monitoramento, e fundamentados em informações que demonstrem a variabilidade espacial das fontes de sedimentos e da redistribuição de sedimentos nas vertentes.

Os processos que detectam as origens dos sedimentos auxiliam na modelagem, pois esclarecem como os diferentes usos, diferentes solos e diferentes coberturas contribuem para a produção de sedimentos, através de análises de composição química dos sedimentos, entende-se a dinâmica do processo de emissão de sedimentos e de solutos, tornando viável o rastreamento em função dos traços químicos acarreados junto com as partículas. Esta técnica auxilia as análises dos processos erosivos e de transporte de sedimentos e solutos, e a avaliação das respostas a partir de diferentes condições ou cenários de uso do solo. Desta forma, obtêm-se a equação universal de perdas de solos, como um instrumento matemático para prever os processos de perda, conforme se observa em alguns modelos de simulações.

Com a aplicação de um modelo de simulação, é possível obter resultados que indiquem condições que venham a minimizar ou sanar o uso e manejos inadequados do solo, tomando como variáveis de estruturação e calibragem deste modelo, condições do solo quanto a sua composição e uso, declividade e clima. Assim é possível propor recomendações de melhores práticas de uso e manejo do solo, para que ocorra o aumento da infiltração de água no solo, e melhor disponibilidade hídrica em períodos de estiagem, redução da erosão, e melhoria da qualidade da água.

Avalia-se a eficiência de medidas conservacionistas na bacia a partir da simulação de cenários futuros sobre modelos calibrados. Desta maneira é possível identificar as áreas hidrologicamente vulneráveis e sua influência no aumento das vazões mínimas, na redução de enxurradas, retenção de sedimento e poluentes, e melhoria da qualidade da água;

Após a calibração e a validação de modelos matemáticos, estes poderão ser empregados para avaliar o impacto positivo ou negativo de um número infinito de situações de uso e manejo do solo e clima, podendo fornecer informações importantes em políticas públicas direcionadas à conservação, manutenção e melhorias relacionadas às bacias hidrográficas, e propriedades rurais.

É importante salientar que quando se trata de simulação existe a necessidade de informações e de dados para abastecer um sistema gerenciador. Esses dados necessitam de uma qualidade fundamental e precisão em modelos de simulação. Tendo em vista tratar-se de dados espaciais e climáticos, faz-se necessário a obtenção de uma vasta gama de informação a ser manipulada através de rotinas computacionais, neste momento deve-se ter a maior acuidade de informação, já que no momento em que se alimenta o sistema com dados equivocados, imprecisos e desatualizados, corre-se o risco de gerar um produto final com erros.

Na presente tese será tomado como unidade de estudo a bacia hidrográfica do Rio Guaporé, por apresentar problemas comuns à maioria das bacias no Brasil. Analisar-se-á os impactos do uso e manejo do solo nos recursos hídricos, com as informações de produção e propagação de sedimentos. Tais informações podem ser utilizadas como indicador das condições de uso e do manejo dos solos na bacia.

1.1 Justificativa

Existe um déficit pertinente à aplicação de modelos que quantifique o quanto de solo está sendo perdido nas bacias hidrográficas, gerando uma lacuna de informações para o desenvolvimento de políticas conservacionistas. Também, há uma falta de informações quanto aos produtos de imageamento a serem utilizados, ou seja, imagens de alta, baixa e média resolução espacial que variam de quilômetros a centímetros, gerando informações com diferentes níveis de detalhamento. Em imagens de alta resolução espacial tem-se a unidade básica de formação, o pixel, com um maior nível de detalhamento no terreno. É importante salientar ainda que, este estudo será um indicativo a ser aplicado em futuras simulações hidrológicas, a fim de se verificar qual resolução espacial gera uma simulação de produção de sedimentos mais próxima da realidade, sabendo-se que o simulador utiliza a equação

universal de perdas de solo, e isso inclui o fator comprimento de rampa e declividade influenciados diretamente pela resolução do pixel.

Deve-se salientar ainda o caráter inédito desta pesquisa à medida que se analisará a aplicação do modelo de simulação SWAT para determinar a vazão líquida e as perdas de sedimento na Bacia Guaporé, considerada de grande porte, também, a influência que o processo de simulação sofrerá relacionando dados simulados com os coletados e com a alteração na resolução do pixel dos três produtos, mapa de uso e ocupação, de solos e declividade por processos de interpolação.

A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta de suporte à decisão na gestão dos recursos hídricos. A utilização de modelos tem proporcionado um melhor conhecimento dos processos que envolvem a água em uma bacia hidrográfica (MORAES et al. 2003), e possibilita que se procurem as melhores práticas de uso e conservação do solo para a manutenção dos sistemas aquáticos (AZEVEDO et al. 1998).

Modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas para entender e simular o comportamento da bacia hidrográfica estudada e prever condições diferentes das observadas, não sendo o mesmo o objetivo da pesquisa, este permite antecipar-se a determinadas situações como alteração do uso do solo, e enchentes, conforme Tucci (1998).

Faz-se importante ressaltar que a aplicação do modelo SWAT trará benefícios sociais e financeiros à população, à medida que, por meio de simulações, seja possível verificar qual uso do solo irá acarretar em menor perda, e conseqüentemente menor custo de produção.

Da perspectiva ambiental, a simulação define qual uso e ocupação irá gerar menos dano ao ambiente, já que desta maneira ocorre à redução dos processos erosivos, assoreamento e contaminação da rede hidrológica.

Na bacia Guaporé, onde se concentra a área em estudo, têm-se buscado encontrar ferramentas que incentivem o desenvolvimento socioeconômico da região, e que proteja os recursos naturais existentes, citando-se o Comitê da Bacia Hidrográfica, que desenvolve projetos direcionados aos recursos hídricos, além de outros órgãos estaduais, federais e privados, cujos objetivos são a melhor gestão dos recursos naturais.

A respectiva bacia foi escolhida para este estudo pela quantidade de dados disponíveis, obtidos através do monitoramento (dados pluviométricos, fluviométricos, meteorológicos) e de estudos já realizados ou, em andamento como os projetos desenvolvidos pela Universidade Federal de Santa Maria, bem como pela possibilidade de avanço no conhecimento dos processos hidrológicos atuantes na bacia.

A utilização de modelos matemáticos permite verificar, quantificar e analisar os possíveis impactos ambientais desencadeados por processos hidrossedimentológicos. Em diferentes locais do mundo bacias experimentais foram equipadas e monitoradas, permitindo observar em escala de detalhes o comportamento de diferentes fenômenos, de modo a entendê-los e representá-los matematicamente (TUCCI et al.1997).

O modelo hidrossedimentológico SWAT se mostra uma ferramenta de auxílio no gerenciamento de bacias hidrográficas, de forma a possibilitar a compreensão de fenômenos e processos complexos e interdependentes, o uso desta modelagem pode ser uma importante ferramenta para análise dos processos hidrossedimentológicos, que ocorrem historicamente na região das bacias, de modo a demonstrar quais os processos erosivos são de maior relevância.

O Governo Estadual do Rio Grande do Sul, juntamente com o Banco Mundial, financia programas como Programa de Combate a Pobreza Rural (RS-RURAL), visando melhorar a qualidade de vida da população rural através de ações voltadas à preservação dos recursos naturais e de infraestrutura rural.

1.2 Problema

A problemática do presente estudo está vinculada à inexistência de simulação hidrológica de vazão líquida e produção de sedimentos na bacia de Guaporé, direcionada a políticas de conservação e uso e ocupação do solo correto. Além disso, salienta-se a ausência de estudos relacionados à resolução espacial do pixel à precisão do modelo de simulação hidrológica, que indique a resolução espacial mais adequada aos processos de simulação.

1.3 Objetivos

1. Determinar como a variação da resolução espacial do pixel influencia a precisão do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação de vazão líquida e produção de sedimentos sem calibração.
2. Determinar a eficiência do modelo de simulação SWAT, calibrado na estimativa de vazão líquida e não calibrado na produção de sedimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida nos seguintes tópicos:

2.1 Bacias Hidrográficas, bacias experimentais, ciclo hidrológico.

2.2 Erosão e produção de sedimentos, equação universal de perdas de solo.

2.3 Geoprocessamento, processos de interpolação de imagens, interpoladores.

2.4 Modelagem de simulação hidrológica, unidades de resposta hidrológica, calibração e validação, modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

2.1 Bacias Experimentais, bacias hidrográficas, ciclo hidrológico

De acordo com Hewlett; Lull; Reinhart, (1969) tem-se a primeira bacia hidrográfica considerada experimental implantada em 1909, no Colorado, nos Estados Unidos da América, com a finalidade de conhecer a influência da floresta no fornecimento de água, estas possuíam monitoramento contínuo contribuindo para a compreensão do ciclo hidrológico e seus efeitos sobre o uso do solo, quando se pensa em balanço hídrico entende-se que o próprio ciclo hidrológico fornece a água disponível a este sistema. Após os vários processos que envolvem o fluxo hídrico, utilizado para estimativa da evapotranspiração em bacias hidrográficas, a partir de informações de precipitação, escoamento superficial e profundo onde a bacia hidrográfica é o espaço de avaliação Tucci et al. (1998).

A hidrologia como ciência realiza o estudo do comportamento, ocorrência e o aproveitamento da água em uma bacia, sobre o fator tempo e espaço, determinando impactos das modificações da bacia sobre os processos hidrológicos, executado na forma de um ciclo fechado de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, onde se têm o armazenamento temporário de água, transporte e mudança de estado, a água precipita-se na superfície como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada, podendo causar o escoamento superficial que trata do movimento da água que caindo sobre solo saturado, escoam pela superfície formando córregos, rios, lagos entre outros, conforme figura um.

Na representação do ciclo hidrológico a drenagem ou escoamento, que é o deslocamento na superfície, pode ser superficial ou subsuperficial, a quantidade de água que escoam depende da intensidade e duração da chuva e da capacidade de infiltração no solo,

quando a água da chuva atinge o solo e escoar sobre ele, inicia-se um processo de dissolução e arraste que transportará material retirado do solo até os corpos d'água, seguindo tem-se o processo de infiltração que é a água que penetra no solo seguido pela percolação que consiste do movimento de água dentro do perfil do solo, responsável pela alimentação dos corpos d'água superficiais, ou profunda, onde a água é conduzida para grandes profundidades, atingindo os aquíferos.

Já quando se relaciona com a atmosfera, a evaporação transforma a água líquida para gasosa, e por finalmente a transpiração que é a perda de vapor d'água pelas plantas (TUCCI et al. 1997).

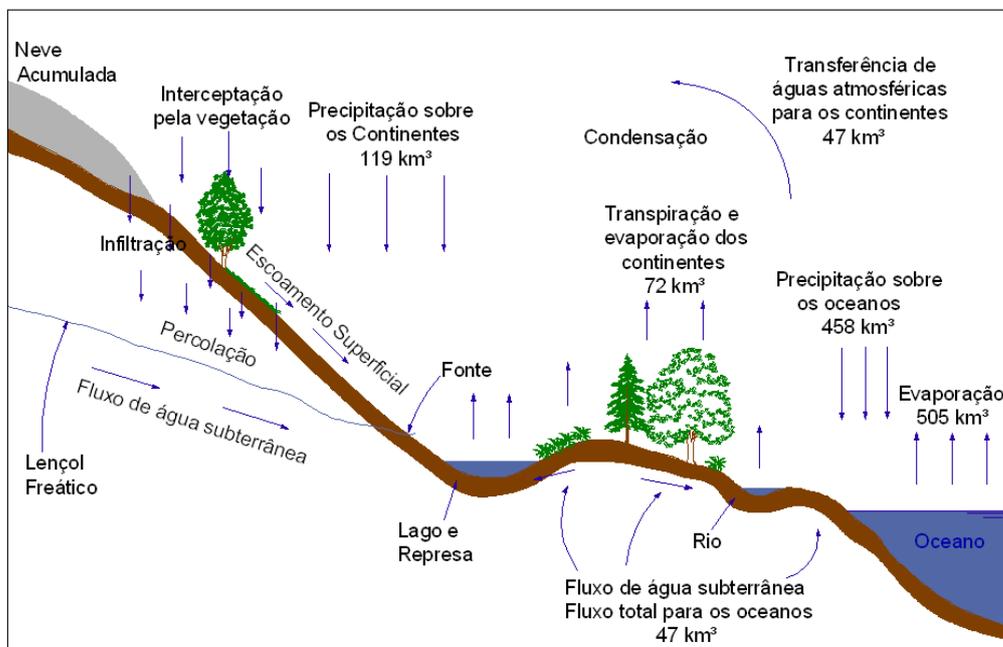


Figura1- Ciclo hidrológico com suas peculiaridades, principais processos e a mensuração dos fluxos de evaporação, precipitação e drenagem.

Fonte: adaptado Tundisi (2003)

2.2 Erosão e Produção de Sedimentos, equação universal de perdas de solo

O aumento da ocupação das áreas por plantios agrícolas, constante urbanização e consequente ocupação das bacias hidrográficas promovem impactos negativos ambientais e socioeconômicos, que se demonstra principalmente por meio dos processos erosivos e a

produção de sedimentos, onde a quantidade de sedimentos que é removida para fora de uma determinada área, representando uma parcela do total de sedimentos que foi produzido em determinada bacia em decorrência de todos os processos erosivos atuantes.

A quantidade total de sedimentos mobilizado em bacias hidrográficas denomina-se de erosão bruta, já a produção de sedimentos representa a diferença entre a erosão bruta e a quantidade de sedimentos que ficou depositada nos sopés das vertentes, depressões do relevo, retido pela vegetação, dentro dos canais de drenagem, entre outros (MINELLA, 2003).

Descrever a quantidade de sedimento produzido nas vertentes (erosão bruta), e a quantidade de sedimento que chega no exultório da bacia (produção de sedimento) é importante para a avaliação do impacto do uso das terras na degradação das bacias e para a investigação do movimento dos sedimentos associados com nutrientes e poluentes (WALLING, 1988).

Ainda, conforme Walling (1988), a relação entre a erosão bruta nas vertentes e a produção de sedimento monitorada nos rios é conhecida como razão de emissão de sedimentos, esta é influenciada por uma larga quantidade de fatores geomorfológicos, hidrológicos e humanos, incluindo a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, apenas uma pequena fração do solo erodido que é convertido em sedimento nas vertentes chega até o exutório da bacia, sendo que a magnitude desta fração diminui principalmente com o aumento do tamanho da bacia, o que está diretamente ligado ao estudo presente da bacia de Guaporé-Rs.

Estes sedimentos transportados por meio de vertentes e sistemas de canais são controlados por meio de sequencia de processos descontínuos, os quais alternam eventos de transporte rápido, com eventos de longo período de armazenamento; esta produção de sedimentos está relacionada diretamente aos processos erosivos que ocorrem nessa bacia, ou seja, da intensidade com que o solo é desagregado por ação da precipitação, dos processos de transferência dos sedimentos da bacia vertente para a calha fluvial e pela propagação desses sedimentos na calha fluvial, conforme Silva (2006), estes sedimentos em suspensão, podem ser classificados como provenientes das camadas superficiais e sub-superficiais, e são provenientes dos sulcos e das ravinas nas vertentes e nos canais aluviais pela remoção de material das margens e do fundo, sedimentos finos provenientes das margens dos canais são retirados pela força hidráulica do escoamento ou pela ressuspensão após o solapamento das margens.

Nas bacias onde as vertentes apresentam alta declividade, a contribuição da erosão superficial para a calha fluvial tende a ser maior devido às características fisiográficas onde as

vertentes apresentam relevo mais suave e largas planícies, diminui o potencial de deposição e a contribuição da erosão na calha fluvial, a produção de sedimentos ocorre em função dos processos erosivos que ocorrem nessa bacia, das taxas de desagregação do solo por ação da precipitação e do escoamento concentrado, dos processos de transferência dos sedimentos da bacia vertente para a calha fluvial e pelos processos de transporte e deposição que ocorrem na calha fluvial (KNIGHTON, 1998).

Resultados obtidos em parcelas experimentais de erosão demonstram os efeitos do uso e manejo dos solos sobre as taxas de erosão, quando alteramos muda-se a escala de representação do fenômeno, saindo das parcelas experimentais para bacia, as evidências do impacto do uso e do manejo do solo na produção de sedimentos são menos claras, existem variáveis que geram alto nível complexidade no relevo, fragmentos de vegetação, construções humanas interferem na relação entre vertentes e as redes de drenagem como fatores controladores da magnitude e da característica da produção de sedimentos têm o clima que pode ser correlacionada com a produção de sedimentos por meio das características da precipitação onde temos volume e intensidade, estas irão determinar, principalmente, a magnitude da produção de sedimentos (WALLING, 1988).

A fisiografia da bacia, declividade do terreno, atributos do solo, características da rede de drenagem, entre outros, irá determinar a capacidade de transferência dos sedimentos pelas vertentes e rios. O efeito do uso e manejo dos solos sobre a produção dos sedimentos tem a propriedade de atenuar ou agravar os fatores anteriores, considerando diferentes escalas, seus resultados sugerem que existem fatores específicos e comuns entre as escalas no controle da produção de sedimentos, o clima é um fator comum a todas as escalas, e a erosão em entressulcos é um fator específico para as menores áreas ou bacias hidrográficas (LANE et al. 1997).

Para quantificar está perda de sedimentos, de acordo com Bertoni (1999), foi desenvolvida a equação universal de perdas de solo - USLE, por meio de equações empíricas dependendo da existência ou obtenção de dados locais específicos. Criada em 1960 por Wischmeyer e Smith, apresenta a seguinte formulação $A = R.K.L.S.C. P$, ou seja:

R= Fator de erosão pela chuva.

K= Fator de erodibilidade do solo.

L= Fator de comprimento do declive.

S = Fator de grau de declive.

C = Fator de uso e manejo.

P = Fator de prática conservacionista.

O R é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em área sem proteção, fator de erodibilidade do solo (K) expressa a intensidade de erosão por unidade de índice de erosão da chuva, para um solo específico que é mantido continuamente sem cobertura, mas sofrendo as operações culturais normais, em um declive de 9% e comprimento de rampa de 25 metros.

O L é a relação de perdas de solo entre um comprimento de declive qualquer com comprimento de rampa de 25 metros para o mesmo solo e grau de declive, o fator de grau do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e o declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa.

O C é a relação entre perdas de solo do terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes do terreno mantido continuamente descoberto, isto é, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado.

O P é a relação entre as perdas de solo do terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro baixo.

2.3 Sistema de Informação Geográfico, processos de interpolação.

Para Oliveira (1999), a flexibilidade do SIG integrada ao modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool – SWAT oferece novas perspectivas para estabelecer e implementar políticas ambientais com o objetivo de reduzir o impacto de atividades antrópicas sobre bacias hidrográficas.

Na década de 80, com o grande desenvolvimento do micro informática, uma nova geração de modelos foi desenvolvida para avaliar os impactos da poluição difusa causada pela agricultura. Os modelos foram estruturados ainda com os conceitos utilizados na Equação Universal de perda de solos alterada, mas agregaram-se algumas rotinas hidrológicas e de processos erosivos que ocorrem no canal. O Sistema de Informação Geográfico (SIG) vem adquirindo uma capacidade de modelação crescente, quer através da concepção de módulos específicos, quer por intermédio do estabelecimento de ligações com diferentes pacotes estatísticos, úteis para construir modelos ecológicos que se pretende relacionar uma determinada característica ou fenômeno medido no terreno com fatores ambientais cuja variação no espaço é conhecida. O modelo pode ser extrapolado para toda a área geográfica que se pretende estudar (BALDISERRA, 2005). O SIG, através de suas rotinas de

processamento de informação na modelagem de dados também atua na melhoria da estimativa de parâmetros de modelos conceituais, na subdivisão automatizada da bacia em unidades hidrológicas similares, na contextualização espacial dos resultados e na simplificação da aplicação operacional do modelo (ZEILHOFER et al. 2001).

Devendo-se salientar que uma das principais funções dos SIG's é a criação do banco de dados para os distintos modelos de simulação, destinando-se à aquisição e ao tratamento de dados georreferenciados. Os modelos mais simples são do tipo empírico, sendo o mais conhecido a Equação Universal de Perdas de Solo que realiza a integração do SIG como os modelos hidrológicos e a sua aplicação em bacias hidrográficas, permitindo-se a realização de um grande número de operações, calibração, simulação e comparação entre os modelos, subdividindo-se a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas (MACHADO, 2002).

Conforme Libos (2002), os SIG's são utilizados nos trabalhos de modelagem através da classificação de imagem de satélite, sendo possível analisar as mudanças de cobertura vegetal de uma área e, prever e localizar os impactos causados pela ação antrópica, permitindo um gerenciamento de bacias mais eficiente e eficaz. A combinação de modelos hidrológicos acoplados ao SIG, bem como o desenvolvimento de metodologias dentro desse ambiente constitui o elemento fundamental para o diagnóstico da situação ambiental e hídrica da bacia, devendo-se observar a necessidade de preenchimento de informações de pontos de controle em pontos onde não dispomos de informação, para isto utiliza-se interpoladores que, segundo Landim (2000), consiste em fazer estimativa de uma variável numérica para regiões nas quais ela não fora medida. E isto pode ser feito por meio do emprego de várias metodologias de interpolação, algumas sendo mais aplicada como a técnica da Krigagem que, de acordo com Cressie (1993), realiza a interpolação para processos espaciais, estima a ocorrência de um processo a partir de observações do mesmo processo em outros locais.

A diferença dos valores de uma variável depende somente da distância entre elas e, identifica-se uma função que explica esta distribuição, a partir desta função pode-se gerar uma grade que atribuirá valores para toda a superfície. É um método muito utilizado nas ciências da Terra para fenômenos com correlação espacial determinante ou de fácil detecção, como na bacia Guaporé - RS, onde os processos de interpolação são utilizados com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial de um determinado atributo, baseando-se em dados amostrais situados numa localidade de interesse com dados disponíveis (JIMENEZ; DOMECCQ, 2008).

Dentre os diversos métodos de interpolação, Silva et al. (2006), citam: Inverso da distância ponderada (IDW), Krigagem e métodos de vizinhos mais próximos. Até mesmo os métodos geoestatísticos tem-se utilizados com frequência para a espacialização de

informações, entretanto, não existe, na literatura, um método que se sobressaia ao outro, mas, deve-se determinar o melhor método para cada circunstância. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) apresentam-se com distintos métodos de espacialização, quanto a sua resolução temporal e espacial. A interpolação por Krigagem torna-se uma alternativa, segundo Gallardo (2006), está é baseada numa função contínua, que explica o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico. Permite associar a variabilidade da estimação com base na distância que existe entre um par de pontos, o qual verifica o nível de similitude que existe entre estes, à medida que se afastam.

O IDW, por sua vez, que seria outra opção a ser executada em grandes bacias, realiza a estimativa da variável ao longo do espaço, ponderando pesos a cada um dos n postos mais próximos, tem-se a função do inverso de uma potência da distância, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado.

O processo de interpolação selecionado no presente trabalho foi Spline, e conforme Deus et al. (2010), para o bacia do rio Itapemirim, demonstrou ser o melhor desempenho do Spline ao métodos IDW e Krigagem esférica (JIMENEZ; DOMEQ, 2008). O método Spline é recomendado para estimar superfícies com variações suaves, como se apresenta em grande parte da bacia hidrográfica em estudo, é uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e interpolar, da forma mais suave possível, com polinômios de grau pequeno, uma subdivisão do intervalo $[a, b]$. Uma função spline de grau p com nós nos pontos $(x_i, f_i)(i=0, m)$ é uma função $sp(x)$ com as propriedades em cada subintervalo $[x_i, x_{i+1}]$ ($i=0, m-1$), $sp(x)$ é um polinômio de grau p . $sp(x)$ é contínuo em $[a, b]$ e tem derivada contínua em $[a, b]$ até ordem p . A spline interpolante é a função $sp(x)$ tal que $sp(x_i)=f(x_i)$ ($i=0, m$).

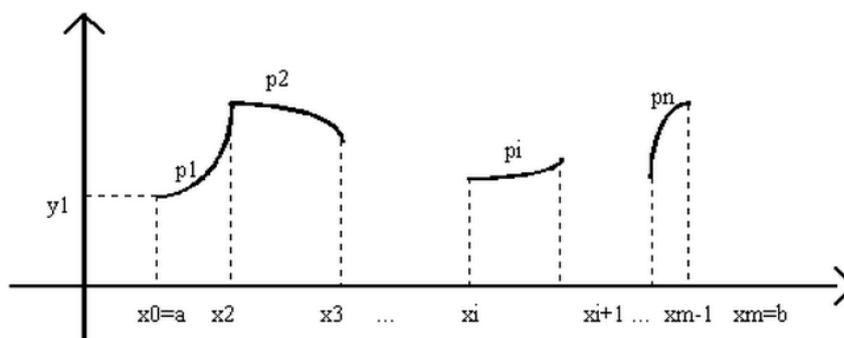


Figura 2: Modelo de Interpolação Spline
Fonte: adaptado Camara, (2001)

Reis et al. (2005), em seu trabalho de espacialização dos dados de precipitação para o estado de Goiás e para o Distrito Federal, utilizando-se os métodos de interpolação IDW e Krigagem, verificou-se que ambos os métodos e suas variantes utilizadas mostraram-se adequados à realização da interpolação, no entanto, ocorreram diferenças pontuais expressivas que chegaram a 21%, valores excessivamente elevados. Ainda, de acordo com Castro et al. (2010), o método de Spline foi o que apresentou-se com melhores resultados para as estimativas das variáveis de precipitação, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, deficiência hídrica, excedente hídrico e disponibilidade hídrica no estado do Espírito Santo.

2.4 Modelagem de simulação hidrológica, modelo Swat, unidades de resposta hidrológica, calibração e validação

De acordo com Machado (2002), modelos hidrológicos e de qualidade da água vêm se desenvolvendo para prever o impacto da agricultura na qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas, com a vantagem de que a aplicação de modelos possibilita o estudo de vários cenários diferentes, como os piores cenários possíveis e diferentes tipos de manejo e práticas conservacionistas, com baixo custo e de forma rápida.

O modelo de simulação, de um modo geral, pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas e consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real.

Conforme Pessoa et al. (1997), a principal vantagem da aplicação de modelos reside quando o problema real apresenta maiores dimensões e complexidade, como uma bacia hidrográfica, além dos custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo. Bevem (2001) coloca ainda que, as limitações nas técnicas de medição é uma forte justificativa para aplicação dos modelos, afinal, o homem não é capaz de medir tudo o que lhe interessa no sistema hidrológico, e são necessários extrapolações de dados medidos no tempo e espaço, particularmente para bacias não monitoradas.

Existem limitações básicas apresentadas pelos modelos hidrológicos, como a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, dificuldade de formular matematicamente

alguns processos, simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos, desconhecimento do comportamento espacial de parâmetros e a não linearidade dos processos hidrológicos (TUCCI, 1988).

Ainda, conforme diversos autores, os modelos hidrológicos sofrem distintas classificações, Rennó (2004), divide os mesmos em estocásticos ou determinísticos, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem e em empíricos ou conceituais, conforme o tipo de relações entre essas variáveis em discretos ou contínuos, de acordo com a forma de representação dos dados, concentrados ou distribuídos, perante a existência ou não de relações espaciais, já para Silva (2006), em função da representação do sistema, os modelos podem ser físicos, análogos ou matemáticos, o primeiro representa o sistema através de uma reprodução em uma escala reduzida, como modelos reduzidos de obras hidráulicas, ou construídos na mesma escala do objeto. Os modelos análogos valem-se da analogia das equações referentes a diferentes fenômenos, para modelar o sistema mais conveniente, o processo desejado. Modelos matemáticos representam a natureza do sistema através de equações matemáticas

Conforme Tucci (1988), um modelo concentrado representa a bacia como um todo, sem possibilidade de divisão, e não se considera a variabilidade espacial dos processos, dados de entrada, condições do entorno e características geométricas da bacia, com as variáveis de entrada e saída sendo representativas de toda a área da bacia, considerando-se somente o tempo como variável independente.

Modelos distribuídos têm por característica representam a heterogeneidade dos fatores que influenciam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, considera-se a variabilidade espacial e temporal dos elementos de uma bacia hidrográfica um modelo discreto quando às mudanças de estado e ocorrem em intervalos discretos. Um modelo contínuo considera a continuidade dos fenômenos no tempo.

Perante o grau de conhecimento e entendimento do sistema, os modelos podem ser classificados em empíricos e conceituais. Os modelos de base física tentam explicar com rigor os processos físicos do sistema, baseados em funções que consideram as teorias ou leis físicas fundamentais (SILVA, 2005; MATEUS 2006).

Conforme Walling (1990), os modelos empíricos foram desenvolvidos para propósitos agrônomicos de planejamento conservacionista e, com isso, a erosão hídrica que o modelo representa enfatiza os processos de erosão em sulcos e entressulcos e desconsidera a erosão por outros processos como voçorocas, solapamento de margens, estradas, além de desconsiderar-se o processo de deposição. Rennó e Soares (2004) propõem que os modelos físicos geralmente são mais complexos que os empíricos, pois se procura descrever todos os

processos que envolvem o fenômeno estudado, mesmo usando muitas vezes relações empíricas entre variáveis diante do comportamento das variáveis ao longo do tempo, os modelos podem ser determinísticos ou estocásticos. Os modelos determinísticos não consideram a probabilidade na sua formulação, gerando sempre uma mesma saída para um mesmo valor de entrada, as incertezas estão relacionadas com a dificuldade dos modelos estimarem de forma razoável a erosão produzida para as condições fisiográficas complexas e heterogêneas que perfazem uma bacia hidrográfica.

Ainda conforme Neitsch et al. (2002), nas grandes bacias a medição e o controle dos processos que regem a geração e o transporte de sedimentos é bem mais complexo, existe um longo caminho a ser percorrido pelo sedimento desde o seu desprendimento do solo e geração, até a chegada no corpo d'água, quando se inicia o transporte do sedimento, existe uma diversidade muito grande de características da bacia, como a cobertura vegetal, a declividade e os tipos de solos, que afetam diretamente a produção dos sedimentos, fazendo o uso mais adequado das equações empíricas, a exemplo da Equação Universal de Perdas de Solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978) e suas derivações Modified Universal Soil Equation-MUSLE (WILLIAN, 1975) e a RUSLE (RENARD et al. 1997). Da mesma forma, o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) e utilizado em grande escala nos Estados Unidos por esta agência, está baseado em equações empíricas no módulo que trata da produção de sedimentos.

No presente estudo optou-se por utilizar-se o modelo Hidrológico SWAT, conforme Srinivasan e Arnold (1994), o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo matemático de parâmetros distribuído e contínuo que permite um número entre 21 diferentes processos físicos, simulando-se em bacias hidrográficas com o objetivo de analisar-se os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas, trabalha-se com vários fatores, como a propagação de água e sedimentos, este com distintas fases, primeira no solo onde é abordado o escoamento superficial (SURQ), segunda no canal onde se tem a vazão líquida (Flow-Out) e a produção de sedimentos (Sed-Out) obtém a desagregação de sedimentos e estes são transportados alcançando a rede de drenagem, por fim, inicia-se a fase de canal no modelo.

O modelo selecionado SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias, com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva-se os parâmetros, especialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da bacia, o modelo foi desenvolvido para prever o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água,

produção de sedimentos e cargas de poluentes em bacia hidrográficas agrícolas. Opera em passo de tempo diário e é capaz de simular longos períodos, para computar os efeitos das variações de manejo no uso e ocupação do solo (SRINIVASAN & ARNOLD, 1994).

Conforme Baldiserra (2005), O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático de parâmetro distribuído, que permite um número de diferentes processos físicos a serem simulados em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água.

O SWAT apresenta algumas limitações para as condições brasileiras, observando-se que as condições para as quais o modelo foi desenvolvido muitas vezes divergem das condições no Brasil. No processo de ajuste são necessárias valores de entrada que muitas vezes não são representativos para as condições brasileiras, o que torna a própria validade dos resultados questionável, e nem sempre existir uma relação linear entre os dados de entrada e a resposta do modelo.

Uzeica (2009) descreve que cada sub-bacia, no SWAT, pode ser parametrizada usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's), que são partes da sub-bacia que possuem uma única combinação de uso do solo/solo/manejo. Isso é possível em função da integração do modelo SWAT com um SIG, como o ArcGis ou o ArcView (o AVSWAT-X é uma extensão desenvolvida para o software ArcView, com interface gráfica para o SWAT).

As estimativas do modelo são influenciadas pelo número de sub-bacias e HRU's que representam a bacia, o aumento do número de HRU's compensa a diminuição do número de sub-bacias, recomenda-se, que uma sub-bacia deva ter de um a 10 HRU's e, caso deseje incorporar uma maior complexidade de uso e tipo de solo na bacia, deve-se definir o maior número de sub-bacias na bacia, escreve Neitsch et al. (2002). Há exceções, como no caso de delimitação de sub-bacias que não conseguem capturar a diversidade de uso do solo sem a incorporação de muitas HRU's. Fitzhugh & Mackay (2000), Jha et al. (2002), Machado (2002), estudaram a influência da subdivisão da bacia, o número de sub-bacias e seu tamanho sobre os resultados fornecidos pelo SWAT, destacam-se os trabalhos de Xavier (2009), onde analisou-se oito diferentes divisões de uma bacia nos EUA, cada uma com um número diferente de sub-bacias e de HRU's a estimativa da produção de sedimentos nas sub-bacias foi bastante afetada pela subdivisão. À medida que se aumentava a subdivisão, a produção de sedimentos aumentava, chegando até a 44% de variação. Segundo os autores, essa diferença esteve relacionada, principalmente, ao fator escoamento superficial, além da sensibilidade dos outros termos da equação universal de perdas de solo, as estimativas do

volume escoado não apresentaram muitas variações em relação ao tamanho das sub-bacias, segundo os autores, em razão do parâmetro Número da Curva (CN), que não sofreu grandes alterações nas subdivisões estudadas.

Conforme Jha et al. (2002), ao analisar o efeitos do número de sub-bacias na estimativa do fluxo e produção de sedimentos e, da perda de nutrientes, em quatro bacias em Iowa, EUA, apresentaram-se conclusões semelhantes às apresentadas por Fitzhugh e Mackay (2000) e Bingner et al. (1997), onde o fluxo não foi significativamente influenciado pelo aumento no número de sub-bacias, em razão do CN não ser afetado significativamente pelo tamanho das mesmas, ainda de acordo com Fitzhugh e Mackay (2000), em relação aos sedimentos produzidos, os resultados mostraram um acréscimo em resposta ao aumento do número de sub-bacias. Os autores ainda indicaram haver um nível limiar de subdivisão da bacia, em torno de 3% da área total de drenagem, na qual a estimativa da produção de sedimentos tende a estabilizar, ou seja, nenhuma precisão adicional é ganha ao se detalhar mais as sub-bacias.

Todavia Machado (2002), através de pesquisas, verificou uma melhora na estimativa da produção de sedimentos com o aumento do número de sub- bacias ou de HRU's, havendo, entretanto, um limite na precisão. A escolha da área limite não deve ser uma escolha arbitrária, mas deve ter como base uma escala necessária para capturar a variabilidade espacial da bacia. Uma maior divisão de sub-bacias na simulação gera maior detalhamento de resultados e, conseqüentemente, maiores valores na produção de sedimentos, o que não reflete sempre em resultados compatíveis com a realidade (XAVIER, 2009).

Conforme JHA et al. (2002), para diferentes escalas, os processos dominantes que influenciam o transporte de sedimentos não são os mesmos, assim, uma escala apropriada de subdivisão das HRU's deveria ser identificada, de forma a simular eficiente e adequadamente o comportamento da bacia hidrográfica

Temos ainda como fator de grande importância na modelagem hidrológica que influência na determinação das HRU's, segundo Machado (2002), nas propriedades da drenagem nas bacias hidrográficas, a representação cartográfica usual do relevo foi substituída gradualmente por Modelos Numéricos do Terreno (MNT's), o que facilitou e muito a tarefa de preparação desses dados. Um importante aspecto na modelagem espacial distribuída é decidir o delineamento de sub-bacias e a extração da rede de drenagem a partir dos MNT's.

Muleta & Nicklow (2005) escrevem que, além da disponibilidade dos dados ser crucial no processo de modelagem, tem a escala dos dados de entrada, o quão representativo é

determinando a qualidade da informação espacial que afeta, diretamente, os resultados dos modelos hidrológicos de simulação, tem-se fatores quali e quantitativos determinantes no sucesso do modelo, a apuração do modelo depende, em grande parte, das características dos parâmetros de entrada onde se descreve as características relevantes da bacia hidrográfica.

Conforme Chaplot (2005), a precisão do modelo numérico do terreno pode afetar a delimitação dos canais de escoamento, das áreas de contribuição, das bacias hidrográficas, verificou-se que a escala do mapa de solos tem uma importância crucial para as previsões do SWAT, com estimativas mais precisas, de escoamento superficial, produção de sedimentos usando mapas com escala de 1/25.000 ao invés de 1/250.000 e 1/500.000, o SWAT é sensível à qualidade dos dados de entrada referente ao tipo e uso do solo, aos procedimentos geográficos de distribuição dos dados realizados na etapa que antecede a fase de processamento do modelo, à precisão do Modelo digital de elevação (MDE) e à escala do mapa de solos.

Diretamente ligado ao MDE, conforme Uzeika (2009), tem-se o comprimento de rampa (LS) utilizado na equação universal de perdas de solo, valores inadequados do LS podem levar a super estimativas para produção de sedimentos, por não levarem em consideração pontos deposicionais de sedimentos, principalmente nos pés das encostas, a equação de propagação de sedimentos no canal não leva em consideração a variação granulométrica dos sedimentos transportados e as alterações dinâmicas que ocorrem na calha do canal, tornando-se o processo muito simplificado.

Após a elaboração das distintas etapas, entre estas a interpolação do MDE, Hartmann (1996), coloca que se devem realizar três passos para produzir modelos de simulação: verificação, calibração e validação. As simulações desenvolvem-se para interpretar e comparar os cenários reais com algo matematicamente criado, por isso, realiza-se modelos com precisão de estudos de casos reais. A verificação do modelo obtém, mediante a comparação dos dados de saída, os valores que são esperados.

Um modelo básico cria e calibra-se de modo que ele corresponda à área em estudo, devendo verificar se está funcionando como esperado com base nas entradas, a calibração é obtida ajustando-se os parâmetros disponíveis para corresponderem com as características observadas no campo.

Têm-se três principais fontes de erro no processo de calibração: erros de entrada, modelo de erro, e erro de parâmetro. Erros de entrada e erros de parâmetro podem ser facilmente ajustados pelo operador, porém, erros do modelo são causados pela metodologia utilizada no modelo.

Após a verificação do modelo e calibração, deve-se validar, comparando-se os resultados obtidos com os esperados ou com os dados históricos, o modelo deverá produzir resultados semelhantes ao que tem acontecido historicamente, esta verificação pode ser feita usando técnicas estatísticas, já a validação é um passo importante para verificar antes de utilizar o modelo como base para produzir dados para diferentes cenários. Se os resultados não correspondem aos valores históricos durante o processo de validação, o modelo deve ser revisto e atualizado para produzir resultados mais fidedignos. O processo de validação do modelo ressalta os cuidados que se teve no planejamento, o rigor e precisão no processo de coleta de dados. Esforços devem ser feitos para garantir que os dados coletados são consistentes com os valores esperados, o processo de validação estabelece a credibilidade do modelo.

Como exemplificação de uso temos, Oliveira (1999), que com o objetivo de avaliar as alterações nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do Rio Jones/Ba utilizou o modelo SWAT, e os resultados obtidos permitiram avaliar de forma quantitativa os efeitos da alteração no uso do solo devido à substituição da vegetação nativa por outras de coberturas diversas, bem como os efeitos da urbanização e construção de barramentos na bacia hidrográfica e as consequências da alteração na zona costeira, Benites et al. (2000), também utilizaram o modelo SWAT na Bacia do Rio “El Tejocote”, localizada em Atlacomulco, no México, com a finalidade de comparar os valores simulados e observados da produção de água, sedimentos, consumo médio e biomassa durante o período de 1980 a 1985. Chegando a resultados que indicam que a calibração do modelo foi satisfatória para a predição de água e sedimentos entre dados simulados e observados.

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

A aplicação do modelo de simulação SWAT apresenta algumas restrições, Moro (2005) propõe que o modelo é incapaz de interpretar chuvas intensas em curtos períodos, o

que impede avaliar picos de descarga que podem ser de maior interesse do que volumes de escoamento superficial na produção de sedimentos, sabe-se que intensidade, duração e frequência da chuva são fatores mais importantes no processo erosivo que os dados de chuva totais, médias mensais ou anuais, ainda conforme o autor, o tamanho, a escala e o número de sub-bacias podem afetar o processo de modelagem e, conseqüentemente, os resultados, pois, um aumento no número de sub-bacias leva a um acréscimo dos dados de entrada e um subsequente esforço computacional de avaliação. De forma inversa, a diminuição poderia afetar a precisão dos resultados simulados.

A maior restrição para a utilização, não só do SWAT, mas de todos os modelos no Brasil, é a falta de dados necessários para alimentá-los e, especialmente, a ausência de dados hidrossedimentológicos que permitam sua validação (UZEIKA, 2009).

3. METODOLOGIA

A presente tese apresenta dois objetivos, divididos em fases, com o intuito de simplificar os aspectos metodológicos. Os passos executados até a fase quatro visam alcançar os resultados propostos para o objetivo um. Para se alcançar o objetivo dois, considera-se a partir da fase cinco. Essas fases estão a seguir elencadas:

Fase 1 - Elaboração dos Mapas de solos, uso e ocupação e declividade.

Fase 2 - Alteração da resolução dos mapas através do interpolador.

Fase 3 - Criação do banco de dados de solos e climático.

Fase 4 - Denominada de filtro de informação, nesta fase se executa o modelo de simulação SWAT para determinar qual resolução das imagens raster sem calibração gerou um produto mais preciso através da análise, dados simulados relacionados a dados medidos.

Fase 5- Análise de sensibilidade do modelo.

Fase 6 - Calibração do modelo em função da análise de sensibilidade.

Fase 7 - Validação do modelo, na qual se executa a simulação comparada a dados coletados não utilizados na calibração.

O primeiro objetivo propõe-se a analisar a resposta de simulação do Modelo SWAT sem calibração na produção de sedimentos e vazão líquida alterando as resoluções espaciais do pixel em 10, 30, 50, 100 e 200 metros, das imagens de uso e ocupação, solos e declividade. Os resultados obtidos na simulação foram comparados aos dados observados em um posto hidrossedimentométrico, e os resultados analisados através dos três métodos matemáticos de percentagens, estatístico e de regressão, gerando uma equação de ajustamento com correlação de dados simulados sem calibração com dados medidos a campo. E, finalizando determinando qual a melhor resolução espacial do produto raster deve ser utilizada no objetivo dois.

Para se cumprir o proposto no segundo objetivo, foi executada a simulação com a imagem gerada na fase anterior, e após realizar-se a análise de sensibilidade que determinará os parâmetros a serem utilizados na calibragem e posteriormente validação do modelo.

Essas fases estão demonstradas no esquema pictórico da figura três.

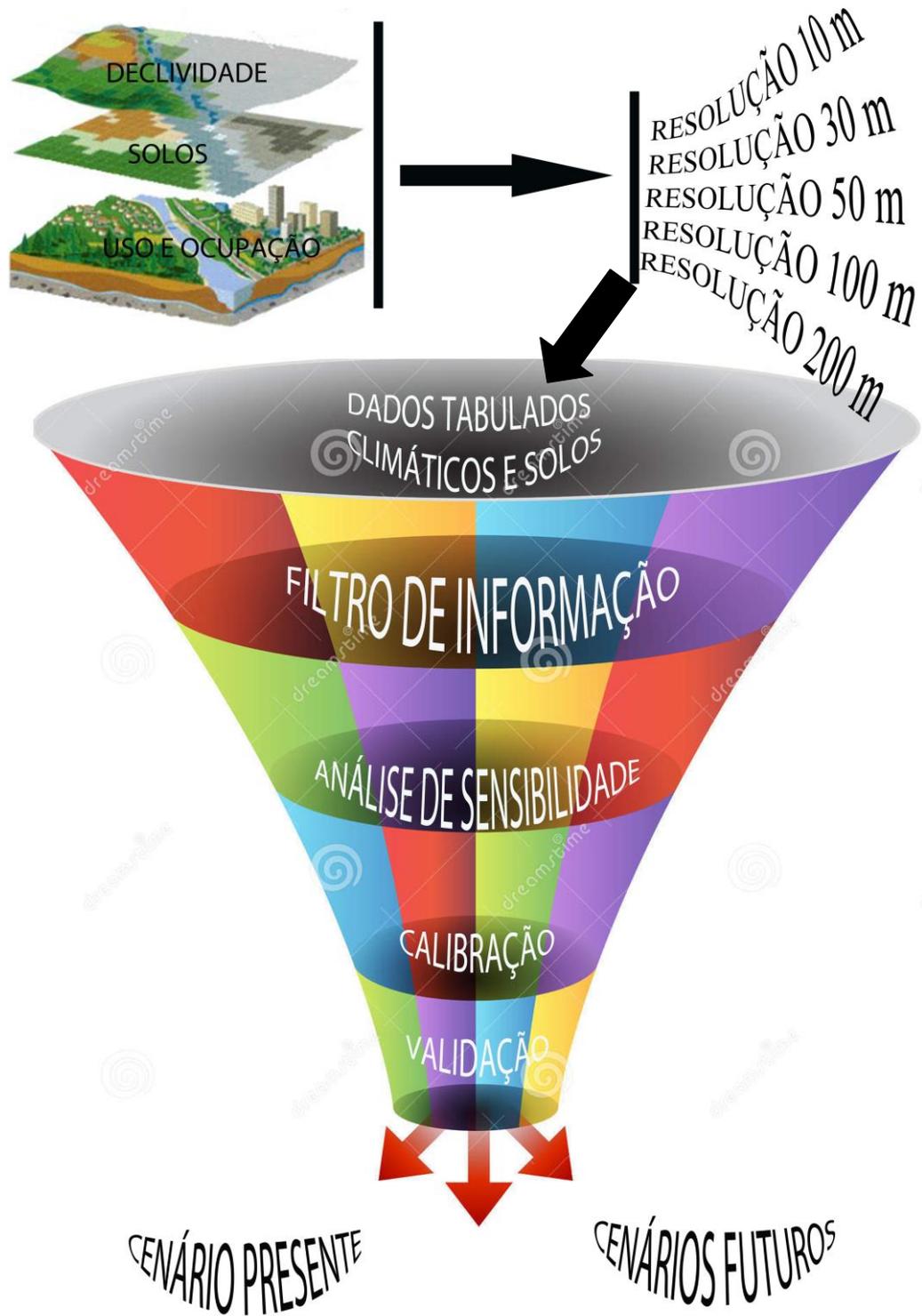


Figura 3 - Esquema ilustrativo do manejo da informação na presente tese.

3.1 Caracterização da área de estudo

Tratar-se-á no presente capítulo da caracterização da área de estudo composta pelos seguintes tópicos: localização da Bacia Hidrográfica Guaporé, fatores sócio econômicos, fatores de solo, fatores climáticos, fatores da hidrologia e topografia, fatores vegetativos e, por fim, localizações dos pontos de Monitoramento dos dados (exultórios).

3.2 Localização da Bacia Guaporé

A bacia de Guaporé com 2.020 Km², como se pode observar na figura 4, está localizada no Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul entre as coordenadas de Latitude de 28°14'26,9" Norte e 28°58'02" Sul e Longitude de 51°54'59" Leste e 52°22'55,71" Oeste apresentando uma extensão de 83,10 quilômetros, e com uma largura de 38,87 milímetros.

Abrange áreas parciais e completas de 17 municípios sendo estes: Mato Castelhano, Gentil, Marau, Santo Antônio do Palma, Vila Maria, Camargo, Casca, Ibirapuitã, Nova Alvorada, Montauri, Guaporé, União da Serra, Itapuca, Serafina Corrêa, Arvorezinha, Ilópolis e Anta Gorda.

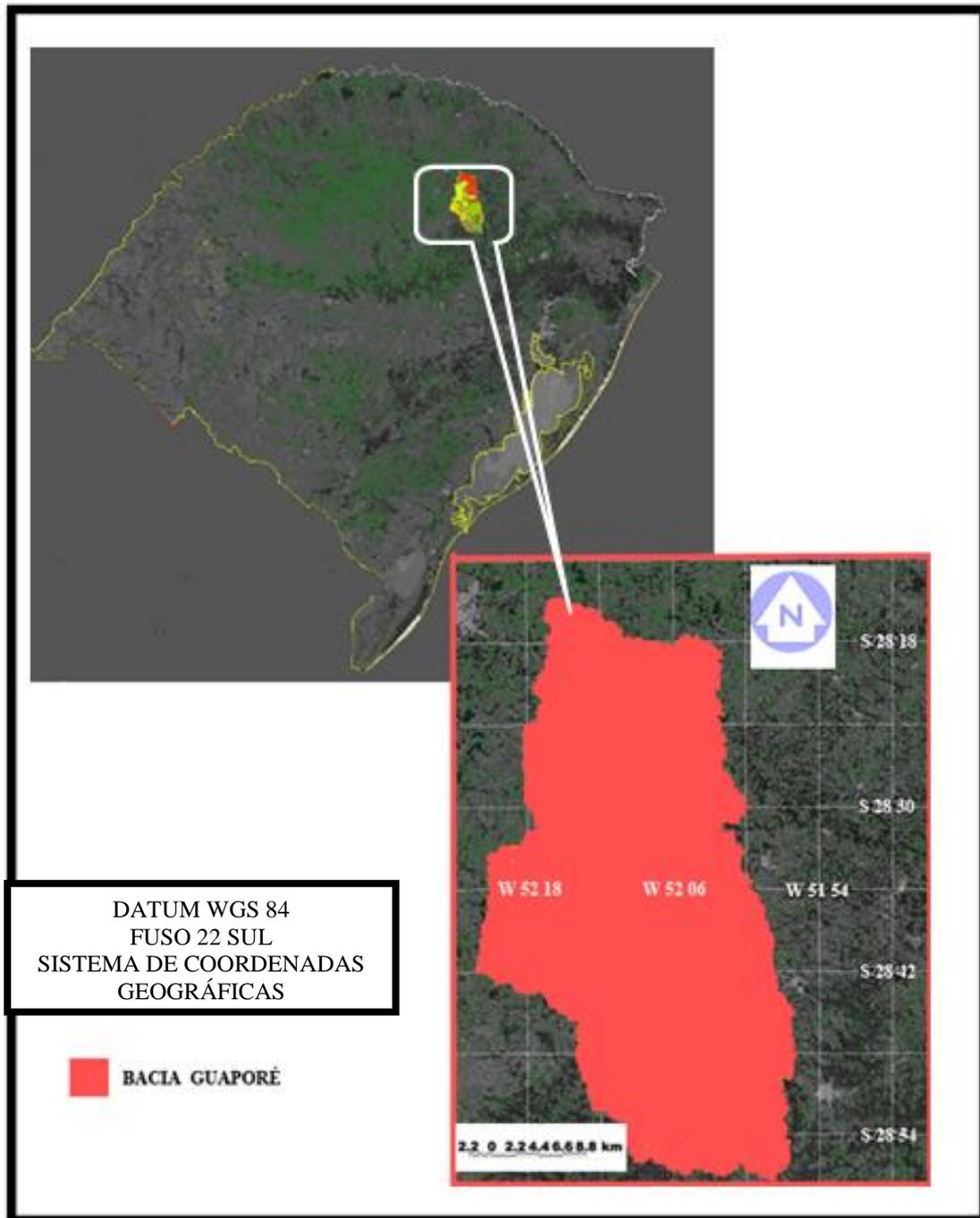


Figura 4: Localização da Bacia dentro do contexto estadual

3.3 Fatores Sócio Econômicos

A região abrangente da Bacia Guaporé apresenta uma colonização do início do século XIX por imigrantes italianos e alemães. Em 1892, foi criada a colônia de Guaporé, que faz parte da Bacia do Guaporé, onde foram demarcados loteamentos com tamanhos entre 25 e 30 hectares, valores estes que representam a grande maioria das propriedades na bacia com algumas áreas mais extensas (UZEICA, 2009).

A bacia de Guaporé, nos últimos 20 anos, tem sofrido uma perda gradativa da cobertura vegetal nativa causada pela ação antrópica, com substituição por diferentes cultivos como o milho, a soja, o arroz e, na última década, principalmente na região em estudo, pelo fumo, erva-mate e eucalipto. Esta redução das áreas de floresta nativa gerou diversos fragmentos florestais.

O processo de expansão agrícola e política, que vem desde a época da colonização teve grande impacto nos anos 70, 80 e 90, onde nem mesmo a legislação foi cumprida, com a preservação das áreas de encostas e mata ciliar, além do excesso de fertilizantes aplicados e intenso revolvimento do solo.

Em algumas áreas mais íngremes na bacia Guaporé, apresenta-se o sistema de plantio convencional do fumo, onde ocorre a aração e após a gradagem (grade de dente), e culturas de inverno como a aveia (*Avena strigosa*) e Ervilhaca.

Na bacia de Arvorezinha, que está enquadrada na bacia maior de Guaporé, há duas situações distintas em relação ao plantio de fumo, que se sucede no restante da bacia. Isto é, em uma primeira área, onde se tem o cultivo mínimo mobilizando o solo na linha de plantio, introduzindo-se a adubação e as mudas de fumo, permanecendo sobre a superfície os resíduos vegetais da cultura anterior, evitando a erosão e o impacto direto das gotas de chuva. E em uma segunda área, com o plantio direto, ocorrendo diretamente sobre os resíduos vegetais, sem revolvimento do solo, presente nas áreas mais ao sul da bacia.

Na região de estudo os principais produtos agrícolas são o feijão, o milho, a soja, o arroz, a laranja, a uva, e hoje o fumo e o eucalipto em pequenas áreas, apresentando ainda uma produção caseira de aguardente, banha, vinho, ovos e queijo.

Apresentam-se algumas cidades, destacando-se Guaporé como polo comercial, industrial, cultural e turístico, que envolve dezenas de municípios da região. Também se destacam as indústrias de calçados, metalomecânica, confecções, implementos agrícolas e moveleiros, além de uma agricultura inovadora que impulsiona o município.

Em relação à agricultura, observam-se duas realidades na bacia em estudo, uma representada por pequenas propriedades e outra por grandes. Na primeira, ocorre em grande parte delas o uso intensivo do solo e práticas inadequadas, gerando uma perda na produtividade, tem-se um aumento das áreas com o plantio de fumo e o eucalipto, estes normalmente realizados em áreas que já apresentam uma estrutura física e química do solo comprometida, ou em fase de comprometimento, onde o relevo é acidentado sem aptidão agrícola para cultivo. Há problemas de manejo de solo, onde as técnicas conservacionistas são inexistentes ou mal aplicadas, uso de equipamentos agrícolas causando uma alta mobilização do solo e incorporação de resíduos, o que favorece o processo erosivo e o aumento da erosão, gerando a perda de capacidade produtiva dos solos, ocorrendo o transporte de sedimentos e a perda das camadas férteis destes, gerando impactos negativos no solo, nos recursos hídricos e na economia.

A Região Sul da Bacia onde se enquadra os municípios de Arvorezinha, Ilópolis, Serafina Correa e Itapuca, apresentam maiores índices de pobreza, em função de apresentarem condições de relevo que dificultam outras culturas e, por caracterizarem-se por pequenas propriedades, o que difere em parte da região norte da bacia, onde se apresenta propriedades rurais melhor preparadas tecnologicamente, com implementos e técnicas de plantio adequadas, com condições de solos e conservação. Estão adaptadas a um uso consciente, onde as condições de relevo facilitam o processo de mecanização, onde predomina áreas maiores de plantio com o milho e a soja.

A região como um todo, conforme dados do IBGE, apresenta um produto interno bruto acima da média das cidades do Rio Grande do Sul, o Índice de Desenvolvimento Social, que considera informações sobre saúde, educação e renda per capita da Bacia é um pouco inferior à média do Estado: 0,67 para 0,74 (FEE, 1996), com taxas médias de analfabetismo de 6,48% e uma expectativa de vida de 74 anos com um índice de mortalidade infantil de 3,8 a cada 1000, dentro da média para o estado do Rio Grande do Sul.

A maioria dos municípios que fazem parte da bacia em estudo apresentam diversas comunidades rurais, que conforme o exemplo de Guaporé tem em torno de 20% da população vivendo no meio rural e 75% nas áreas urbanas.

Mesmo tendo ocorrido nos anos passados um alto fluxo de migração do campo para os centros urbanos, grande parte do orçamento dos municípios vem das áreas agrícolas. Existe uma gama de programas através da Secretaria de Agricultura dos diversos municípios que procuram incentivar o produtor rural a permanecer no campo.

Em áreas de menor densidade populacional, predomina a criação extensiva de gado. Já, a região sul da Bacia Guaporé se caracteriza pela predominância de pequenas propriedades. Encontram-se ainda algumas áreas nos trechos de encostas de vales, antes ocupadas por práticas agrícolas do milho, que foram abandonadas gradativamente, dando lugar ao plantio do fumo, sendo estas abandonadas, e hoje observando o retorno da vegetação, gerando um mosaico em vários estágios de regeneração.

As principais áreas agrícolas localizam-se nas cabeceiras dos rios Guaporé, onde há predominância das culturas de milho e de soja. Ao norte da Bacia, nas áreas mais planas predomina a cultura do milho, soja e algumas áreas de arroz.

3.4 Solos

A Bacia de Guaporé localiza-se em parte na Serra Gaúcha, com altitudes que variam de 206 m a mais de 832 m de altitude, situando-se entre o Planalto e a Depressão Central, formado por rochas ígneas de efusão, originárias do fim do período triássico ou jurássico. É região do basalto, que assenta sobre o arenito e, sob esse, o granito. Parte da Bacia Guaporé está localizada em regiões de Vales, onde predomina pequenas e médias propriedades. A bacia em estudo é composta por cinco tipos de solos conforme classificação da EMBRAPA (2006).

A – Chernossolo - Com uma área de 502,8 Km² localizado na parte sul da bacia encontra-se em uma região com relevos mais escarpados, solos pouco avançados, originários de rochas ricas em cálcio e magnésio e minerais esmectíticos, alta atividade da argila e eventual acumulação de carbonato de cálcio, promovendo reação aproximadamente neutra ou moderadamente ácida a fortemente alcalinos, com enriquecimento em matéria orgânica.

São classificados pela presença de horizonte diagnóstico superficial A chernozêmico de alta saturação por bases, teores elevados de carbono orgânico e de carbonato de cálcio acima de um horizonte B textural, ou com caráter argilúvico e argila de atividade alta, segundo critérios definidos pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006).

O desenvolvimento destes solos depende de condições que favoreçam a formação e a persistência de um horizonte superficial rico em matéria orgânica e com alto conteúdo de cálcio e magnésio, e de argilominerais de estrutura 2:1, especialmente do grupo das esmectitas.

Estes solos apresentam alto potencial agrícola devido às características químicas: alta fertilidade natural (eutróficos) associada principalmente aos altos teores de cálcio, de magnésio e de matéria orgânica, baixa a mediana acidez e alta capacidade de troca de cátions relacionada à sua mineralogia.

Com relação às características físicas, variam de solos pouco profundos a profundos, podendo apresentar suscetibilidade aos processos erosivos pela presença de horizonte subsuperficial B textural ou de horizonte com caráter argilúvico (gradiente textural).

Os solos de texturas mais leves ou os mais argilosos, mas de boa estrutura e sem alto gradiente textural, são normalmente mais porosos, apresentando boa permeabilidade, sendo menos suscetíveis à erosão (EMBRAPA, 2006).

B - Latossolo - Com uma área de 497,30 Km² fica localizado na região central mais plana, com grandes áreas cultivadas, os solos são de alta fertilidade natural e boas características físicas, utilizado para lavouras mecanizadas devido à topografia e características físicas adequadas, são constituídos predominantemente por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresentar mais que 150cm de espessura.

As argilas são predominantemente do tipo caulinita, cujas partículas são revestidas por óxidos de ferro, responsáveis pelas típicas cores avermelhadas. A transição entre horizontes é gradual ou difusa e quase sempre a única diferença a notar no perfil é um escurecimento do horizonte A, ocasionado pelo acúmulo de húmus advindo de uma intensa decomposição de restos vegetais. A textura ou granulometria é também uniforme, uma vez ser destituído do horizonte B. Neste horizonte, a estrutura é composta de agregados com formato arredondado e de tamanhos muito pequenos (0,5 a 3,0 mm), os quais são numerosos e acomodados de modo a deixarem uma grande quantidade de macroporos entre eles, o que proporciona uma alta permeabilidade à água, mesmo com elevados teores de argila.

São solos em geral profundos, velhos, bem drenados, baixo teor de silte, baixo teor de materiais facilmente intemperáveis, homogêneo, estrutura granular, sempre ácidos, nunca hidromórficos. Podem ser eutróficos (saturação por bases maior que 50%) ou distrófico (saturação por bases inferior a 50%); São solos minerais, não-hidromórficos, profundos (normalmente superiores a 2 m), horizonte B muito espesso (> 50 cm) com sequência de horizontes A, B e C pouco diferenciados; as cores variam de vermelhas muito escuras a amareladas, geralmente escuras no A, vivas no B e mais claras no C. A sílica (SiO₂) e as bases trocáveis (em particular Ca, Mg e K) são removidas do sistema, levando ao

enriquecimento com óxidos de ferro e de alumínio que são agentes agregantes, dando à massa do solo aspecto maciço poroso; apresentam estrutura granular muito pequena; são macios quando secos e altamente friáveis quando úmidos.

Apresentam teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80%. São solos com alta permeabilidade à água, podendo ser trabalhados em grande amplitude de umidade. Os latossolos são muito intemperizados, com pequena reserva de nutrientes para as plantas, representados normalmente por sua baixa a média capacidade de troca de cátions. Um fator limitante é a baixa fertilidade desses solos. Contudo, com aplicações adequadas de corretivos e fertilizantes, aliadas à época propícia de plantio de cultivares adaptadas, obtêm-se boas produções. (SiBCS, 2009).

C – Argissolo - Com uma área de 278,7 Km² localizado na parte sudoeste, composta por áreas planas e encostas de média declividade, terreno suavemente ondulado, solos mais profundos apresentam uma coloração avermelhada, variando a mais brunada.

Apresentam horizonte de acumulação de argila, B textural (Bt), com cores vermelho-amareladas devido à presença da mistura dos óxidos de ferro hematita e goethita, elevada acidez na maior parte do perfil, o que se deve aos altos teores de Al³⁺ trocável (≥ 4 cmolc/kg) e baixa saturação de base (< 50%).

Em áreas mais úmidas, variando de bem a mal drenado em função do relevo, bem estruturados e bem drenados; com sequência de horizontes A, Bt; A, BA, Bt; A, E, Bt etc.

Há predominância do horizonte superficial A do tipo moderado e proeminente, apresentam principalmente a textura média/argilosa, podendo apresentar em menor frequência a textura média/média e média/muito argilosa, têm uma sequência de horizontes A-Bt-C, apresenta horizontes A e B bem distintos em relação a textura, apresentam uma baixa etc gerando pouca capacidade de retenção de nutrientes para cultura.

Apresentam-se em relevo suavemente ondulado, com declividade inferior a 10%, ocorrem próximos as nascentes, até parte inferior das coxilhas, baixa a muito baixa fertilidade natural, com reação fortemente ácida e argilas de atividade baixa, podem apresentar o caráter eutrófico ou distrófico, porém, raramente com alta saturação por alumínio, indicando baixa a média fertilidade natural, textura franco argilosa no horizonte A e muito argilosa no B (> 60% argila), tem baixa permeabilidade e descontinuidade na infiltração de água na zona de transição do horizonte A para o B.

D – Neossolo - Ocupando uma área de 179,6 Km² na bacia, localizado na região Sudeste, área íngremes com presença de matas de galeria umbrófila mista, solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20cm de

espessura, apresentando perfis com uma sequência de horizontes A-Cr-R ou A-A/Cr-R, onde a rocha situa-se em profundidade maior do que 0,5 m da superfície apresentam uma alta pedregosidade, onde a retirada destas permite uso mais intensivo com culturas anuais, possibilitando práticas agrícolas mecanizadas, porém devido a sua profundidade limitada retém pouca água armazenada, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. São solos pouco profundos (< 1,0 m) a profundos (<1,5 m).

Os teores de argila apresentaram valor médio de 20%, tanto no horizonte A como no C, estes valores teores baixos, associados às declividades acentuadas em algumas partes da bacia Guaporé conferem aos solos maior suscetibilidade à erosão.

A CTC pH7 é relativamente alta, aparentemente, os valores mais altos ocorrem nos perfis derivados de rochas básicas, como o basalto, enquanto as rochas ácidas e arenitos apresentam os valores mais inferiores. Os teores de Alumínio podem variar de 1,1 a de 4 cmolc kg⁻¹, este último valor configurando toxides.

E - Luvissole - Com uma área de 561,7 Km² na parte norte, áreas de plantio relativamente planas, constituídos por material mineral, são solos minerais não hidromórficos definidos pelo SiBCS (EMBRAPA, 2006) pela presença de horizonte subsuperficial diagnóstico textural (Bt) imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, exceto A chernozêmico, ou sob horizonte E, argila de atividade alta e saturação por bases alta, variam de bem a imperfeitamente drenados, pouco profundos 60 a 120cm, apresenta diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles, possuem mudança textural abrupta, moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos, com teores de alumínio extraível baixos ou nulos e presença, em quantidade variável mas expressiva, de argilominerais do tipo 2:1 indicando atividade alta da argila.

Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e/ou caráter solódico ou sódico, na parte subsuperficial, normalmente associados às áreas de relevos movimentados (ondulados a forte ondulados).

A alta saturação por bases implica em alta fertilidade natural (eutróficos), conferindo potencial para o uso agrícola. Com relação às características físicas, apresentam normalmente boa permeabilidade. Nos relevos mais declivosos, os de menor profundidade apresentam limitações para o uso agrícolas relacionadas à restrição a mecanização e suscetibilidade aos processos erosivos.

3.5 Fatores Climáticos

A bacia possui um clima subtropical úmido, com verões tépidos e invernos moderadamente frios, com chuvas regulares e estações relativamente bem definidas, sendo comuns as geadas, e com ocasional queda de neve nos pontos mais altos. Durante o inverno, há a ocorrência de névoas pela manhã e a umidade relativa do ar geralmente é alta.

Conforme classificação de Koppen, a bacia está em uma região de tipo climático predominante subtropical úmido, com duas variedades principais de clima, Cfa com altitudes inferiores a 600 m, caracteriza-se por temperaturas médias compreendidas entre -3°C e 18°C para o mês mais frio, e superiores a 22°C para o mês mais quente, com precipitação bem distribuída durante o ano e total anual em torno de 1400 mm; Cfb temperaturas médias do mês mais quente inferiores a 22°C e precipitação total anual superior a 1600 mm, em consequência da altitude, já que predomina nas áreas com cotas superiores aos 600 m.

De acordo com Quadro et al. (1996), a climatologia da região é determinada pelos fenômenos: *f* Sistemas frontais, que são responsáveis por grande parte dos totais pluviométricos registrados; *f* Sistemas convectivos de mesoescala; e, *f* Relação de anomalias positivas de precipitação e a ocorrência do fenômeno El Niño.

3.6 Fatores da Hidrologia e Topografia

Cinco são os principais rios que drenam esta Bacia em função da formação de um relevo bastante acidentado na parte sul da bacia Guaporé, sofrendo uma suavização na parte central e norte. São eles: Capingui, Guaporé, Anta Gorda, Carreiro e Arroio Marau, formando sub-bacias típicas de planalto (acima de 700 m de altitude), sub-bacias de encosta (entre 700 m e 200 m de altitude) e sub-bacias de baixada (inferior a 200 m de altitude).

A topografia proporciona aos rios formadores da Bacia características diferenciadas em função da variação de altitude. A diferenciação topográfica confere à Bacia três áreas com padrões de paisagem distintos:

- altitudes superiores a 700 m: o planalto caracteriza-se por possuir declividade acentuada (média de 4,8 m/km), com afluentes encaixados e muitas corredeiras.

- altitudes entre 700 m e 200 m: apresenta uma declividade menos acentuada (média de 1,6 m/km), com vales encaixados e corredeira.
- altitudes inferiores a 200 m: com pouca declividade (média de 0,2 m/km) e raras corredeiras

O relevo da região apresenta-se em três fases distintas, plano a suavemente ondulado, ondulado; e, fortemente ondulado a montanhoso mais na região sul da bacia (UZEICA, 2009).

3.7 Fatores Vegetativos

A vegetação apresenta três regiões fitogeográficas associadas à Mata Atlântica: a Floresta Ombrófila Mista, a Floresta Estacional Decidual e as Savanas. Em função das dimensões da Bacia do Guaporé, esta é composta por distintas regiões fitogeográficas, com um aglomerado de vegetação que se desenvolve em grandes áreas contínuas, e apresentam flora e fauna semelhantes.

A – Savana - também denominada de Cerrado é representada pelos campos, com matas de galeria ao longo dos cursos d'água e remanescentes florestais em estágio de regeneração avançada. As características geomorfológicas, com vales estreitos e profundos e uma rede de drenagem densa, propiciaram a conservação do patrimônio ecológico da Bacia. Região plana onde a vegetação predominante são as gramíneas, árvores esparsas e arbustos isolados ou em pequenos grupos. Este tipo de vegetação encontra-se em maior quantidade na região central bacia de Guaporé.

B - Floresta Ombrófila Mista - normalmente nas áreas acima de 500 m, a Floresta Ombrófila Mista está mais presente na região norte e sul da bacia. Com predominância de floresta de araucária, com chuva ocorrendo durante o ano todo, altitudes elevadas entre 400 e 1000 metros, contém espécies de angiospermas e coníferas, apresentando espécies de lauráceas como a imbuia (*Ocotea porosa*), o sassafrás (*Ocotea odorifera*), a canela-lageana (*Ocotea pulchella*), além de diversas espécies conhecidas por canelas, erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e a caúna (*Ilex theezans*), leguminosas (jacarandá, caviúna e monjoleiro) e mirtáceas (sete-capotes, guabiroba, pitanga), pinheiro-bravo (*Podocarpus lambertii*).

C - Floresta Estacional Decidual - grande parte das áreas da Floresta estacional Decidual sofreu substituição por cultivos anuais, principalmente na região central da bacia Guaporé. Este tipo de vegetação apresenta-se em altitudes inferiores a 500 m. Sua vegetação original encontra-se em bom estado de conservação nas encostas íngremes dos vales, de

difícil acesso e inadequadas ou de difíceis práticas agrícolas, é encontrado mais comumente na parte sul da bacia de Guaporé, com vegetação pertencente ao bioma da Mata Atlântica. Apresenta duas estações climáticas, uma com chuvas intensas de verão, seguidas por um período de estiagem.

Compreende as florestas das porções médias e superiores da Bacia do Guaporé, apresentando uma divisão extratificada em três dosséis. O primeiro composto quase integralmente por árvores decíduais com até 30 m de altura, como grápia (*Apuleia leiocarpa*), angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*), louro-pardo (*Cordia trichotoma*), canafístula (*Peltophorum dubium*), a peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*), o jatobá (*Hymenaea stilbocarpa*), o palmitreiro (*Euterpe edulis*), a figueira-do-mato (*Ficus organensis*), a batinga (*Eugenia rostrifolia*), o mata-olho (*Pachystroma longifolium*) e o palmitreiro (*Euterpe edulis*) ao lado das retromencionadas peroba-rosa e jatobá, entre outras.

O segundo com copagem mais densa, formada por lauráceas e leguminosas, onde a canela-fedida (*Nectandra megapotamica*) apresenta uma maior dispersão.

O terceiro estrato apresenta um grande adensamento de indivíduos pertencentes a poucas espécies, especializadas na colonização de clareiras, onde as mais comuns são taquaralissa (*Merostachys multiramea*) e criciúma (*Chusquea ramosissima*), vassoura-braba (*Baccharis dracunculifolia*), o fumo-brabo (*Solanum mauritianum*), a grandiúva (*Trema micrantha*) e a pata-de-vaca (*Bauhinia forficata*), entre os arbustos; a canela-guaicá (*Ocotea puberula*), o angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*) (REITZ, 1983).

3.8 Localizações dos pontos de Monitoramento dos dados (exultórios).

O programa de monitoramento iniciou-se com a implementação de bacias hidrográficas experimentais no estado do Rio Grande do Sul para avaliar o impacto de medidas de conservação de solo e água na melhoria de aspectos ambientais, econômicos e sociais de áreas com elevado índice de pobreza rural.

Foi realizada a instalação dos mecanismos de monitoramento hidrossedimentométrico na região do município de Guaporé (RS), pertencente à bacia Guaporé, região centro-norte do estado do Rio Grande do Sul, divididos em dois locais, o primeiro é a estação de dados hidrosedimentológicos administrada pela UFSM - Universidade Federal de Santa Maria-, com coordenadas UTM de 407107 metros L e 6801437 metros S, e a segunda pertence à ANA -

Agência Nacional das Águas-, composta pela coordenada UTM de 407.109 m L e 6.801.458 m S, denominada Linha Colombo, ambas pertencentes ao Fuso UTM 22 com uma distância entre ambas de aproximadamente 80 metros, conforme podemos visualizar na figura cinco.

Localizados nas cabeceiras de um afluente da margem esquerda do rio Guaporé que pertence ao sistema fluvial Taquari-Antas, afluente do rio Jacuí, um dos principais rios da bacia da Região Hidrográfica do Atlântico Sul, as coletas tiveram início desde 2010, com toda a estrutura de coleta já instalada e fornecendo dados.

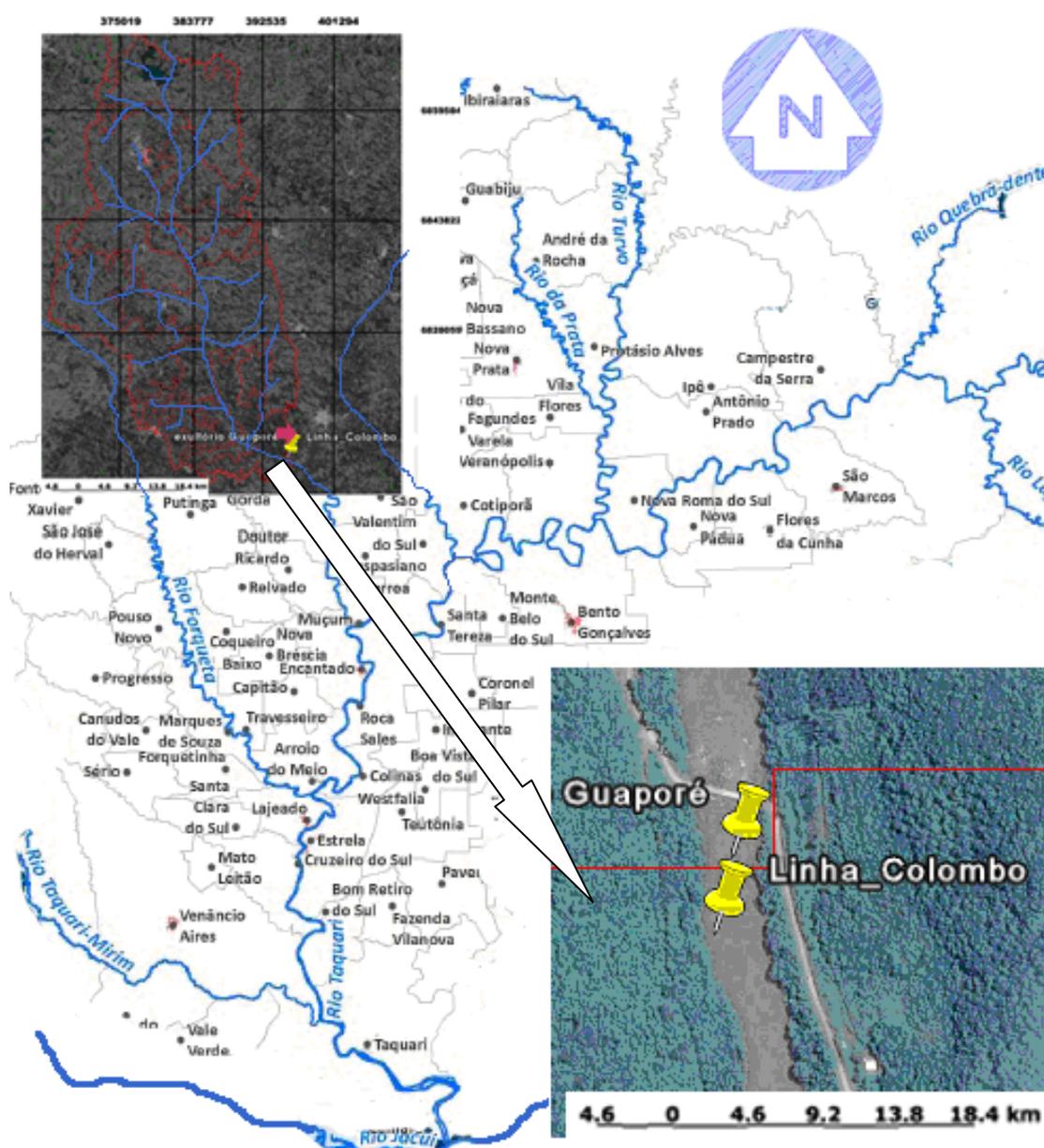


Figura 5 - Localização das Estações de Coleta de dados e Rede Hidrológica da região
Fonte: adaptado Tundisi (2003)

3.9 Coletas de campo Hidrosedimentológicas

Os equipamentos utilizados foram: estação meteorológica (Davis®), calha Parshall de concreto (1, 829 m na menor seção), linígrafo de pressão, cinco pluviômetros e amostradores de sedimentos (USDH48, amostrador de nível ascendente e amostrador para a análise química). A distância entre a seção de amostragem para sedimentos (montante), e a calha Parshall (jusante) é o suficiente para não haver interferências entre os dois locais de medida. O segmento do canal na seção de monitoramento é retilíneo e caracterizado por um perfil transversal retangular com 2,0 m de largura e 0,6 m de altura.

Os equipamentos automáticos apresentam um sistema de aquisição de dados (sensores) e data logger. A cada vinte dias, um membro da equipe deslocou-se para os locais de monitoramento e coletou estes dados. Os dados hidrológicos, climáticos e sedimentológicos foram tabulados, organizados e verificado sua consistência. Esse procedimento possibilita verificar erros no monitoramento e falhas no funcionamento de equipamentos ou metodologias de aquisição de dados, e a rápida intervenção para a sua solução. A partir desta etapa, os dados estarão disponíveis para a interpretação dos processos e aplicação dos modelos.

O processo tradicional de monitoramento hidrossedimentométrico utiliza uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos, que possibilitam o cálculo do fluxo de sedimentos, caracterizado pela descarga sólida de sedimentos em suspensão e produção de sedimentos, que é a integração do fluxo de sedimentos em determinado tempo, quanto maior for a frequência de amostragem melhores resultados serão obtidos.

Um número maior de amostragem em um menor intervalo de tempo aumenta a probabilidade de coincidir o momento da coleta com os eventos de cheia, os quais são responsáveis pela maior parte da produção de sedimentos.

As amostras da mistura água e material em suspensão foram analisadas para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão no instante da medida. A concentração de sedimentos multiplicada pela vazão instantânea forneceu a estimativa da descarga de sedimentos, que integrado no tempo forneceu a estimativa da produção de sedimentos.

Para as condições de bacia de cabeceira o transporte de sedimentos ocorre quando há escoamento superficial nas vertentes e, conseqüentemente, incremento significativo na vazão.

Uma vez que a descarga sólida medida nos rios correlaciona-se estreitamente com os processos erosivos que ocorrem em uma bacia, esse parâmetro é um dos melhores indicadores para avaliar o impacto das ações voltadas para preservação dos recursos naturais (água e solo), o monitoramento será realizado utilizando a infra-estrutura já existente (calha parshall, linígrafo pressão, estação meteorológica, pluviógrafo, pluviômetros, turbidímetro e amostradores de sedimentos).

O monitoramento da concentração de sedimentos foi realizado durante os eventos de chuva, onde ocorre o transporte de sedimentos. O método utilizado foi a amostragem com a utilização do amostrador DH48 do início ao fim do evento. Foi utilizado também o amostrador semi-automático denominado Amostrador de Nível Ascendente (ANA). Este tipo de amostrador é uma alternativa para assegurar a coleta de amostras na possibilidade da existência de falhas, ou seja, em situações em que o hidrotécnico não esteja presente e no preenchimento de falhas propriamente dito. A turbidez é método automático de estimativa da concentração de sedimentos, este coleta sinais a cada dez minutos e os resultados são corrigidos e validados com os resultados da coleta do amostrador DH48.

A quantidade de sedimentos que transita na calha do rio durante um evento de chuva apresenta variabilidade temporal e espacial na seção de medição. A coleta das amostras do escoamento durante os eventos de precipitação-vazão tem a finalidade de determinar a concentração de sedimentos em suspensão no escoamento.

As amostras coletadas foram levadas para o Laboratório de Física do Solo UFSM para ser determinada a concentração de sedimentos em suspensão através do método da evaporação. As amostragens de campo foram realizadas por um hidrotécnico treinado com o apoio de alunos de pós-graduação e o acompanhamento do professor responsável.

3.10 Definição dos limites da bacia (Máscara de Recorte)

Uma das primeiras etapas a ser executada trata-se da delimitação da área de estudo, a Bacia Hidrográfica de Guaporé. A fim de se poderem gerar os limites de recorte desta área, também denominada de máscara de recorte, fez-se necessário a identificação dos divisores de água. Esse processo foi realizado utilizando-se as imagens planialtimétricas fornecidas pela EMBRAPA, originárias do levantamento da NASA do ano de 2000. A partir desse levantamento utilizou-se um SIG (Sistema de Informação Geográfico) ArcGis para

delimitação dos limites da bacia através da subfunção exercida pelo módulo SWAT, denominada Waterhead Delineator (Delimitador de Bacia Hidrográfica). Realizado de forma automatizada, após a inserção de um ponto de exultório, o que no presente caso é o ponto onde foram realizadas as medições sedimentológicas.

De posse dos limites da bacia, converteu-se a mesma para extensão SHAPE, utilizando-se nas demais fases onde se tornou necessário a delimitação de áreas para identificar o limite da Bacia Guaporé.

3.11 Mapa de Declividade

Mapas de declividade são produtos que através das curvas de nível ou isolinhas na cartografia digital representam a variação de altitude do terreno em relação ao nível médio dos mares, demonstrando como o relevo se comporta, sendo de crucial importância em qualquer projeto. O produto mais comum e conhecido são as cartas do exército, que são levantamentos planialtimétricos, e que servem como base de dados, também denominados de mapa base.

Estes mapas podem ser elaborados a partir de cinco metodologias. Na primeira usa-se uma carta Planialtimétrica do exército e sob uma mesa digitalizadora realiza-se a vetorização das curvas de nível. Trata-se de um processo obsoleto que não traz precisão por ser suscetível a erros cometidos pelo operador, em função das mudanças sofridas no papel no decorrer do tempo e devido aos erros na elaboração da carta, tais como erros no transpor os dados para carta ou ainda, erros de campo que foram transferidos para carta.

No segundo processo, converte-se a carta analógica em um produto digital, e todo o processo realizado sob uma mesa digitalizadora passa a ser executado na tela do computador a partir de um sistema de informação geográfico. Porém, recorrem os mesmos erros da primeira metodologia havendo, entretanto, uma maior facilidade neste em relação ao anterior em função da capacidade de execução do zoom digital que facilita a visualização das curvas de nível, muito importante em áreas muito íngremes onde as curvas estão muito próximas.

No terceiro processo, considerado o mais preciso e adequado, é, entretanto também o mais oneroso, já que consta da ida a campo com equipamentos de topografia visando à realização de levantamento planialtimétrico. Hoje em dia, com a tecnologia do Sistema de Posicionamento Global e por processos denominados de levantamento cinemático com

equipamentos de dupla frequência é possível realizar uma classificação de forma bastante rápida e precisa. Todavia, vale mencionar que no presente caso de estudo, o tamanho da bacia inviabiliza este processo por se tratar de uma bacia de 2.020 km² com tempo e custo de levantamento inviável.

No quarto processo, considerado ainda relativamente novo, tem-se o levantamento por equipamentos denominados de VANT, isto é, veículos aéreos não tripulados, que são aeronaves com capacidade de tirar fotografias aéreas e coletar pontos planialtimétricos pelo sistema GPS, determinados por um plano de vôo chamado de waypoint. Essas imagens e pontos são posteriormente pós-processados e interpolados gerando as isolinhas conhecidas como curvas de nível.

E finalmente, na quinta metodologia, a qual foi utilizada na presente tese, baseou-se em dados fornecidos pela Agência Espacial Norte Americana (NASA), projeto determinado de SRTM (Shuttle radar missão topográfica), tratando-se de uma missão que tinha por objetivo gerar um modelo digital do terreno, tendo início no ano de 2000.

O SRTM apresenta uma resolução espacial nativa de 90 metros e se apresenta em um sistema de compressão de imagem denominado de Geotiff, a imagem raster apresenta informações de cabeçalho, que tornam o produto raster amarrado a um datum e sistema de coordenadas. Trabalhou-se com o datum WGS84, com imagens obtidas no site da Embrapa do Brasil, disponibilizadas para download, considerando que o erro vertical pode chegar a 16 metros em alguns pontos.

Para elaboração do mapa de declividade utilizou-se como máscara o limite da bacia determinada na etapa anterior e através da álgebra de mapas sobrepõem-se este sobre a imagem das curvas fornecidas pela NASA, realizando-se o corte desta tendo o arquivo delimitante shape como base, gerando-se como produto o mapa de declividade, conforme figura seis.

MAPA HIPSOMÉTRICO DE DECLIVIDADE
DA BACIA HIDROGRÁFICA
DE GUAPORÉ -RS -

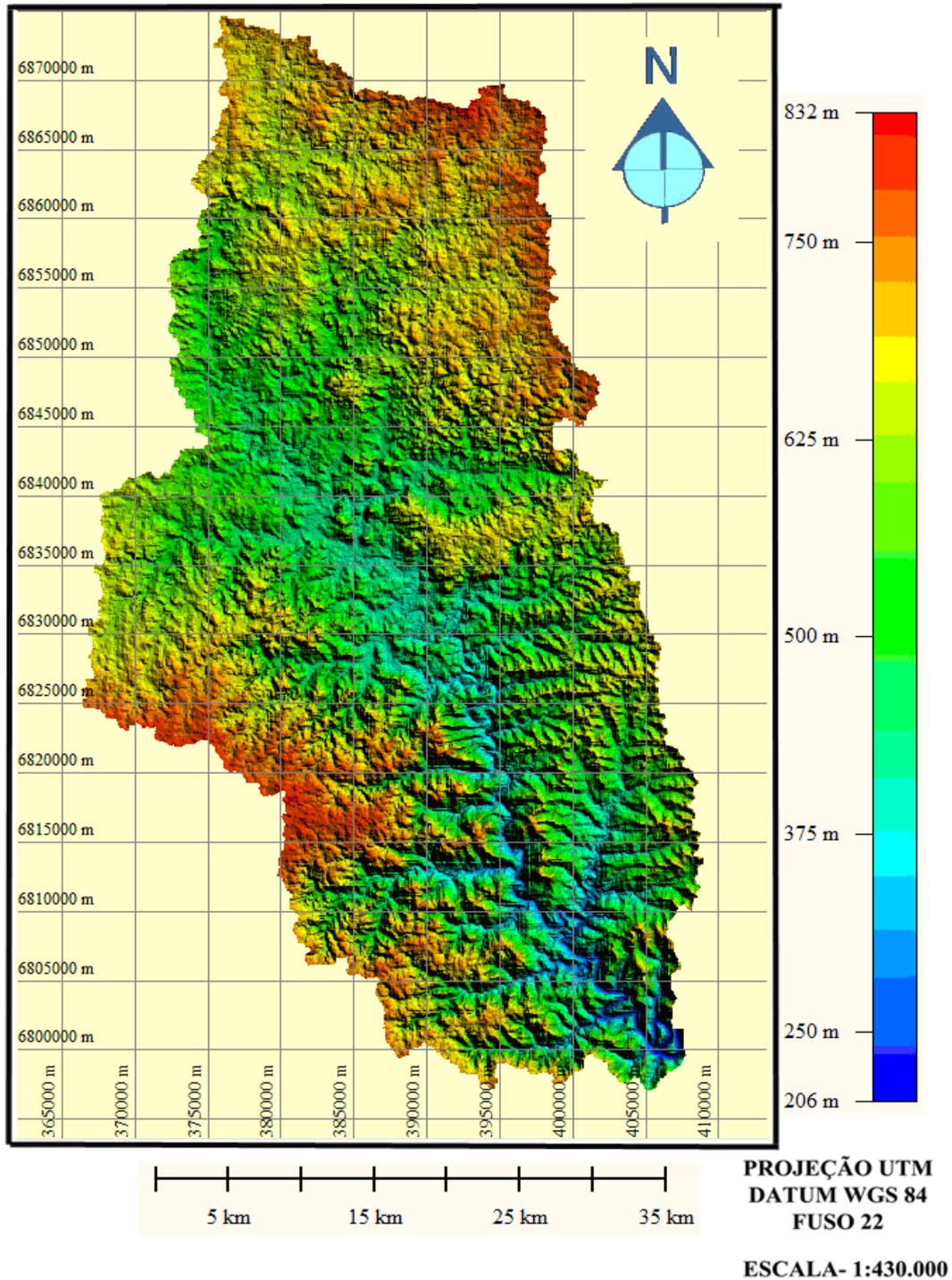


Figura 6 - Mapa Hipsométrico de Declividade da Bacia Guaporé.

Como um dos objetivos do presente trabalho foi de se observar como a alteração das resoluções influenciam no processo de simulação hidrológico estipulou-se que seriam testados resoluções espaciais de 10, 30, 50, 100 e 200 metros. Para tanto, realizou-se a interpolação dos pixels da imagem utilizando-se o processo de interpolação denominado de SPLINE no aplicativo ArcGis. Esse, diferente dos outros interpoladores, realiza o ajustamento da superfície em função de valores conhecidos e não em função da média, que nem sempre é representativa da realidade, apresenta-se dois tipos de Spline, Regularized e Tension, este ultimo produz uma superfície mais plana que o Regularized. O Spline Tension obriga a superfície gerada a ser mais fiel aos valores reais dos pontos. O Spline Regularized gera uma superfície mais elástica, no presente caso trabalhou-se com o Spline Tension.

Observa-se que ocorre um aumento no tamanho do arquivo original no processo de interpolação, onde a mudança na resolução de 90 metros para 10 metros aumentou 60 vezes, em algumas situações os pontos se encontram muito próximos com pequenas variações de gradientes.

Realizou-se a interpolação no aplicativo, necessitando primeiramente que a imagem raster das curvas de nível tenha sido convertida em um arquivo de pontos e após esta conversão tem-se inicio o processo de interpolação que começa no Spatial Analyst tools, através da sub-rotina interpolation e finalizando no Spline, conforme figura sete.

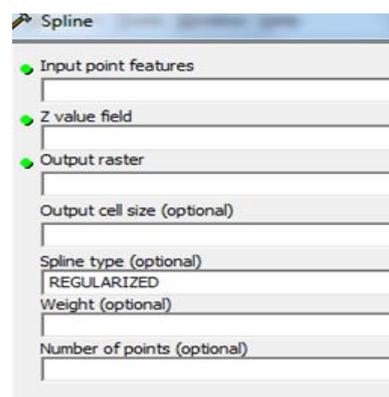


Figura 7: Rotina do Spline com a imagem gerada ao lado.

Após, obteve-se as imagens interpoladas com 10, 30, 50, 100, 200 metros, conforme figura oito, obtendo-se os respectivos dimensionamentos de matriz e tamanho de arquivos, conforme tabela um.

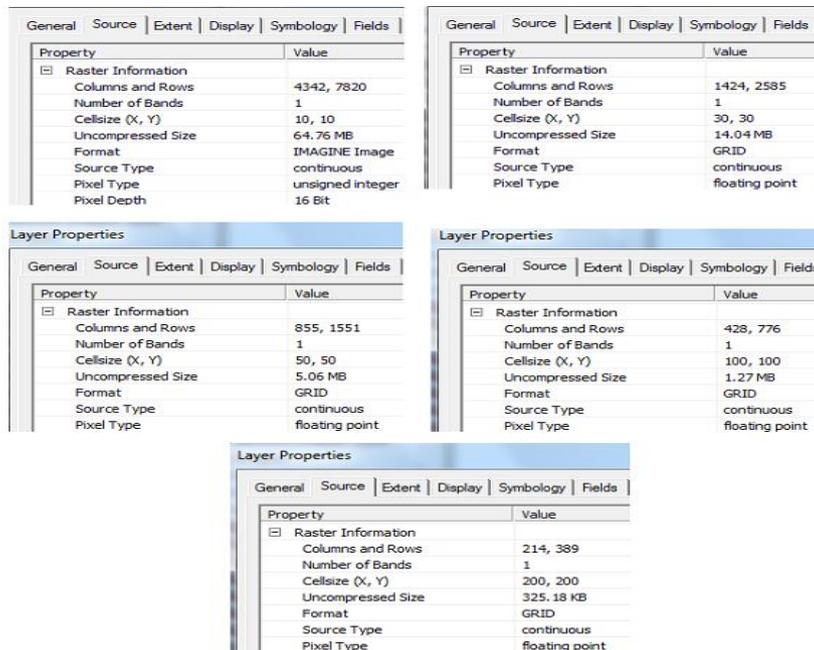


Figura 8- Dados após execução das rotinas de interpolação das curvas de nível.

Tabela 1- Parâmetros determinados em cada imagem raster após interpolação.

<i>Tamanho célula interpolada</i>	<i>Tamanho arquivo</i>	Número de linhas por coluna
10 metro	67,76 Mb	4342 X 7820
30 metros	14,04 Mb	1424 X 2585
50 metros	5,06 Mb	855 X 1551
100 metros	1,27 Mb	428 X 776
200 metros	0,35 Mb	214 X 389

Observa-se que existe a necessidade de os mapas de solos, uso, ocupação e declividade estarem na mesma resolução em cada processo de simulação.

3.12 Mapa de Uso e ocupação do solo

Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, primeiramente existe a necessidade de selecionar o tipo de produto que se utilizará. Em relação à resolução espacial, existe uma gama de sensores que trabalham com diferentes resoluções. Na presente tese optou-se por utilizar as imagens disponibilizadas no servidor do Google Earth, que trabalha com diferentes sensores, entre eles o Landsat, Spot, para produtos de média resolução e para alta o Quickbird, como desejamos um produto que tenha uma melhor resolução selecionamos as imagens do último, o plano focal, incluindo o CCD (Charge coupled device), que realizam a varredura eletrônica em fileira linear (pushbroom linear array), são flexíveis para visadas off-nadir até 25°, ao longo do terreno imageado.

O satélite foi colocado em órbita a partir da Vandenberg Air Force Base (Califórnia, EUA), em 18 de janeiro de 2001, a Digital Globe disponibiliza as imagens nas formas Pancromáticas (PAN), Multiespectral (MS) e como Pan-sharpened que possui 0,70m de resolução, uma composição colorida natural (vermelho, verde e azul) ou infravermelho (vermelho, verde e infravermelho próximo). As imagens PAN e MS são adquiridas com 11 bits, podendo ser fornecidas em 16 ou oito bits.

Estas imagens podem ser adquiridas pela Digital Globe a um valor que pode variar de 25 a 90 dólares o Km², ou seja, se as adquiríssemos para o presente projeto que possui uma área de 2.020 km², estar-se-ia com uma soma de 50.500,00 dólares, levando-se em consideração a imagem de 25,00 dólares, existindo a opção de se trabalhar com as imagens de forma gratuita no próprio servidor do Google, porém, com alguns cuidados e seguindo uma metodologia proposta no presente estudo.

3.13 Sobreposição da Máscara de Recorte ao banco de Imagens do Google

Após ter sido criado a máscara de recorte e esta ter sido convertida no formato de extensão de arquivo identificável pelo Google, KMZ, deve-se importar que esta fosse sobreposta ao local de pesquisa, realizando-se após esta rotina o ajustamento de parâmetros para extração da imagem do Google, conforme se observa na tabela dois. Estes parâmetros devem permanecer constantes durante todo processo de coleta, onde a altitude do ponto de

coleta refere-se à elevação em relação ao nível médio dos mares no momento da visualização da imagem, orientação geográfica, e orientação do relevo, este último é a relação entre o relevo e o momento de visada instantânea no qual se captura a imagem, estes tem que ser paralelos entre si, fatores estes que devem ser cumpridos para evitar deformações espaciais nas imagens.

Tabela 2- Parâmetros de calibragem na tomada das Imagens

<i>Parâmetro</i>	Unidade de medida
Altitude do ponto de visão	7.000 metros
Orientação Geográfica	Norte 90° Zenital em relação ao solo
Orientação do Relevo	Norte 90° Zenital em relação ao solo

Depois de estabelecidos os parâmetros, passamos para o processo de coleta das imagens, imitando um processo de aerolevantamento convencional, estipula-se as linhas de coleta de imagens, e estas devem ter áreas de sobreposição, trabalha-se com um valor mínimo aproximado de 20% de cobertura na linha e 10% entre linhas, determinados visualmente, estamos particionando a imagem delimitada da bacia para que obtenhamos um produto com alta resolução espacial, cada uma destas é salva em um formato de arquivo de compressão de imagem denominado Tiff.

No final do processo na presente bacia obteve-se um total de 42 imagens.

3.14 Mosaicagem das Imagens

Processo no qual a imagem original que foi particionada volta a ser restituída compondo uma única imagem, pode ser executado de forma automatizada ou manual, no presente caso, após algumas tentativas, optou-se pelo processo manual, pois a automatizada não apresentou bons resultados.

- Processo automatizado - algoritmos do aplicativo identificam grupos de pixel com seu fator f de brilhos iguais e determina como sendo um ponto de sobreposição, processo demorado e bastante suscetível a erros, principalmente na situação da bacia de Guaporé,

devido sua extensão, obtivemos problemas na identificação o que ocasionou uma imagem espacialmente distorcida.

Pelo processo manual, calculou-se o tamanho da imagem a ser gerada em função do número de linhas verso número de colunas do total de todas as imagens que fazem parte da área, após, criou-se um plano de fundo com as dimensões desta nova imagem, que foram selecionadas, recortadas, e eliminado os produtos indesejados como marca do *Google* e ferramentas de manipulação da imagem. Processo que foi realizado sucessivamente com todas as imagens, como produto final obteve a imagem do nosso local de pesquisa mosaicada manualmente. Salvou-se a mesma com formato Tiff, o que gerou uma imagem de 4.1 Gigabytes de espaço no disco rígido.

Após, coloca-se esta no plano de fundo, e sucessivamente este processo foi realizado com todas as imagens da área do projeto, observando-se a necessidade da área de sobreposição entre as diversas imagens, como produto final obteve a imagem do local de pesquisa mosaicada manualmente.

Observa-se que por se optar por trabalhar com imagem de alta resolução espacial e a área do projeto ser bastante extensa, gerou-se um arquivo na proporção dos gigabytes, surgindo o problema de memória necessário para manipulação de uma imagem deste tamanho. Neste caso, deve-se trabalhar com equipamentos com alta capacidade de processamento, tanto por parte do processador central como pelas memórias randômicas de acesso.

Em função da área da Bacia de Guaporé ser bastante extensa, 2.020 Km², as imagens que compõem a área foram feitas em épocas distintas, sobre condições atmosféricas e calibragem do sensor diferenciada, gerando produtos com respostas espectrais variadas para uma mesma classe. A solução para este problema foi o desmembramento da imagem e separação dos produtos em função da homogeneidade do fator de brilho para as distintas classes, gerando-se seis imagens que posteriormente à classificação foram novamente reagrupadas formando uma imagem única.

3.15 Desmembramento da Imagem Mosaicada.

Em função da coleta das imagens terem sido realizadas em um servidor gratuito, identificaram-se problemas em relação à resolução espectral da imagem, já que estas são

geradas em épocas distintas e apresentam uma radiometria diferenciada, ou seja, o mesmo alvo na superfície se comporta espectralmente de maneira distinta.

A fim de se realizar os processamentos de informação seguintes, deve-se eliminar este problema, fazendo-se uma análise visual com o objetivo de detectar esta mudança radiométrica, faz-se necessário cortar a imagem e gerar um novo arquivo, finalizou-se esta rotina com seis imagens desmembradas, todos os processos executados incluindo a classificação tiveram que ser repetidos cinco vezes.

Observa-se no exemplo o mesmo tipo de plantio com fator de brilho diferenciado, figura nove.



Figura 9 - Área de uso idêntico com resposta espectral diferenciada.

3.16 Importação de imagens

Após as imagens prontas para serem manipuladas, foram importadas para o Sistema de Informação Geográfica que irá executar a rotina seguinte do processo de preparação do produto imagem para ser utilizado no simulador SWAT. No presente processo optou-se por trabalhar com o aplicativo desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), denominado de Spring, em virtude dos algoritmos de classificação utilizados pelo mesmo, posteriormente migrou-se para a plataforma ArcGis.

A importação foi realizada através da ferramenta *Impima*, no qual, primeiramente abriu-se a pasta onde se localiza a imagem gerada na etapa anterior. Após a imagem carregada o programa automaticamente reconhece o número de linhas, colunas e o número de bits da imagem, separando esta imagem de bandas proporcional, as três cores básicas que compõem uma imagem colorida (vermelho, verde e azul).

Deve-se selecionar a imagem e atribuir à resolução espacial desta que no presente caso, tratando-se das imagens *Quickbird* foram utilizadas como sendo 0,7m, registrou-se esta resolução e ativou-se a opção desenhar, a qual executou a composição da imagem, salvou-se a mesma como banda 1, então se realiza o mesmo processo para a banda 2 e banda 3, estando as imagens convertidas para a extensão de arquivo legível pelo programa *Spring*, a partir deste momento as imagens estão disponíveis para serem utilizadas como produto do sistema de informação geográfico *Spring*.

3.17 Criação do banco de dados e elaboração do projeto

Foi realizada a criação do banco de dados, local onde serão armazenadas todas as informações *rasters* vetoriais e tabulares do projeto. Estão disponíveis quatro tipos de modelos de dados, optando-se no presente trabalho pelo sistema gerenciador de banco de dados *Acess*.

Como projeto, entende-se a área de abrangência espacial no presente estudo, esta delimitação foi feita utilizando o sistema de coordenadas UTM, onde se tomou o valor da coordenada no canto superior direito e no canto inferior esquerdo como sendo as coordenadas delimitantes do projeto, determinou-se o fuso, no presente caso, fuso 22.

3.18 Georreferenciamento e mudança de projeção

O aplicativo SWAT necessita que os dados estejam em um mesmo sistema de projeção, sendo sistemas de coordenadas de Mercator (UTM), para tal procedemos com a mudança de projeção e determinação do fuso 22.

Uma das etapas importante é o processo no qual me atribuí às coordenadas de monitor coordenadas de campo, denominamos georreferenciar, onde os valores X e Y do pixel de tela são substituídos por coordenadas UTM de campo. Para a realização do registro ou georreferenciamento foram necessários:

1. Escolher os pontos de controle - são feições possíveis de serem identificadas de modo preciso na imagem e no mapa ou campo, como por exemplo, cruzamento de estradas.
2. Definir a equação de Mapeamento - escolhendo qual equação polinomial será usada para gerar a análise de regressão matemática, primeiro, segundo ou terceiro grau, estas são influenciadas pelo número e pontos de controle, sua dispersão no terreno e a variabilidade do relevo, após, faz-se a re-amostragem dos pixels e determinam o erro de ajustamento através do RMS, erro médio quadrático, conforme se selecionaram os pontos, os cálculos de erro (em unidades de resolução “pixel”) serão automaticamente apresentados.

Trabalhou-se com 17 pontos por imagem, apresentando esta quantia uma distribuição homogênea de pontos na área do projeto, utilizou-se um polinômio de segundo grau para realizar o ajustamento, quanto mais pontos, desde que bem distribuídos e precisos, melhor o registro até um determinado limite, onde o ajustamento não sofre mais melhoras, o erro se propaga de forma pseudo-aleatórias e tende a não sofrer mais variações em certo nível de ajuste.

3.19 Mapeamento de classes

Durante a elaboração do mapeamento de classes, identificam-se os diferentes usos e ocupação do solo e atribuíram-se as mesmas e distintas classes armazenadas no banco de dados, onde se cria um arquivo de atributo indexado, este é determinado estatisticamente através de intervalos de confiança, e a assinatura espectral do alvo determina a qual classe este pertence. Optou-se por criar cinco classes denominadas de plantio um e dois, solo exposto, e floresta arbustiva e subarbustiva que serão mais adiante caracterizadas, esta escolha justifica-se em função do tamanho da área ser muito extenso e da grande variabilidade espectral e temporal apresentada pelos alvos, o que inviabilizou a distinção dos diferentes tipos de cultura, onde somente realizando visitas a campo ou adquirindo imagens de mesma época teriam condições de realizar a distinção dos alvos.

O processo de classificação quanto ao agrupamento de pixel pode ser pixel a pixel ou por regiões, também determinado como segmentação, onde na segmentação trabalha-se com grupos de pixels e analisa-se não somente o valor de brilho do pixel, mas também a forma de agrupamento.

A classificação de imagens pixel a pixel ainda divide-se quanto à presença de um operador determinando as classes, esta se chama supervisionada, e não supervisionada quando executada pelo hardware. Durante o processo de classificação ocorreu à identificação dos diferentes usos de ocupação do solo, para isso o sistema de informação geográfico utiliza classificadores que através de algoritmos criam intervalos de classes que atribuem os diferentes usos.

Realizou-se o teste de classificação com os diferentes algoritmos, estabelecendo-se uma metodologia para selecionar o melhor classificador que determinou a imagem a ser utilizada no simulador SWAT.

3.19.1 Supervisionada

Baseia-se na acuidade visual e no conhecimento de campo do observador “operador”, executando as seguintes rotinas nos aplicativos que realizam processo de classificação supervisionada.

Primeiramente, a imagem a ser classificada é selecionada, alguns sistemas de informação geográficos realizam a decomposição da imagem nas três bandas referentes às cores básicas, verde, vermelho e azul, para realizar o processo de classificação e outros trabalham com a imagem composta, após a imagem estar ativa faz-se o processo denominado de treinamento, que consiste no ensinamento ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), de qual objeto (intervalo de fator de brilho de pixel) pertence a qual classe.

Para cada classe devem ser coletadas no mínimo dez amostras. Na rotina treinamento, insere-se o nome de cada uma das classes atribuindo para a mesma uma cor, depois de inserido estes dados aplica-se o processo de aquisição das amostras, coletando as mesmas.

Observando o maior grau de pureza na coleta, ou seja, cada coleta realizada para um único uso, apresentaram três algoritmos para realização de classificação supervisionada, os diferentes algoritmos de classificação utilizados na presente tese estão abaixo citados conforme Manual do ArcGis 9.3 2009.

Algoritmo Maxver, ou Máxima Verossimilhança, classificação "pixel a pixel", considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Para que seja preciso o suficiente, é necessário um número razoavelmente elevado de "pixels", para cada conjunto de treinamento, estes definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento. Estas distribuições de probabilidade representam a probabilidade de um "pixel" pertencer a uma ou outra classe, dependendo da posição do "pixel" em relação a esta distribuição. Observa-se uma região indicando que um determinado "pixel" tem igual probabilidade de pertencer às duas classes. Nesta situação, estabelece-se um critério de decisão a partir da definição de limiares. Os limites de classificação são definidos a partir de pontos de mesma probabilidade de classificação de uma e de outra classe.

Algoritmo Maxver ICMS, o classificador MAXVER associa classes considerando pontos individuais da imagem, o classificador MAXVER-ICM (Iterated Conditional Modes) considera também a dependência espacial na classificação. Em uma primeira fase, a imagem é classificada pelo algoritmo MAXVER atribuindo classes aos "pixels", considerando os valores de níveis digitais. Na fase seguinte, leva-se em conta a informação contextual da imagem, ou seja, a classe atribuída depende tanto do valor observado nesse "pixel", quanto das classes atribuídas aos seus vizinhos. O algoritmo atribui classes a um determinado "pixel", considerando a vizinhança interativamente. Este processo é finalizado quando a '%' de mudança (porcentagem de "pixels" reclassificados), definida pelo usuário é satisfeita. O aplicativo fornece ao usuário as opções de 5%, 1% e 0.5% para valores de porcentagem de mudanças. Um valor 5% significa que a re-atribuição de classes aos "pixels" é interrompida quando apenas 5% ou menos do total de "pixels" da imagem foi alterado.

Distância Euclidiana é um procedimento de classificação supervisionada, que utiliza esta distância para associar um "pixel" a uma determinada classe. No treinamento supervisionado, definem-se os agrupamentos que representam as classes. Na classificação, cada "pixel" será incorporado a um agrupamento, através da análise da medida de similaridade de distância Euclidiana, que é dada por: $d(\mathbf{x}, \mathbf{m}) = (\mathbf{x}^2 - \mathbf{m}^2)^{1/2}$ onde:

x = "pixel" que está sendo testado

m = média de um agrupamento

N = número de bandas espectrais

O classificador compara a distância Euclidiana do "pixel" à média de cada agrupamento. O "pixel" será incorporado ao agrupamento que apresenta a menor distância

Euclidiana. Este procedimento é repetido até que toda a imagem seja classificada. O classificador *Maxver* utiliza quatro limiares de aceitação, sendo estes 100%, 99%, 95% e 75%. Quando as imagens já classificadas são analisadas e estipuladas às amostras como o valor limite para aceitação destas 95%, ou seja, todas as amostras dos diferentes usos que tiverem com valor de aceitação inferior ao determinado são eliminadas, e novas coletas são realizadas.

Após, as imagens classificadas dentro dos padrões estabelecidos serem salvas como diferentes planos de informação deveram ocorrer à verificação visual e determinação de qual modelo classificador gerou melhor resultado, essa escolha é realizada ao analisar a imagem real da área com os planos de informações classificados.

3.19.2 Não –Supervisionada

Neste caso é utilizado o classificador K-médias, onde não é eliminado nenhum tipo de amostra, pois a identificação dos conjuntos de intervalos de brilho dos diferentes usos, ou seja, intervalo de classes, são realizadas automaticamente pelo aplicativo, trabalhando com 2, 4, 5, 6, 8, 10 e 12 temas, e 2, 5, 10 iterações durante esse processo, cada imagem é salva como um plano de informação, conforme processo anterior à seleção da imagem mais adequada é feita através do processo visual comparando-se imagem real com a imagem classificada, conforme tabela três.

3.19.3 Determinação do desempenho dos algoritmos de classificação

Para determinarmos qual algoritmo apresentou melhor desempenho no processo de classificação da imagem e utilizarmos estes nos demais processos de classificação das demais áreas do projeto determinaram-se dois processos de análise.

a- Análise estatística – Baseado na análise estatística que o aplicativo executa no momento que análise o índice de acerto das amostras coletadas e no índice global de acerto no processo de classificação.

b- Análise Visual de conformidade - processo bastante subjetivo onde se deve observar a capacidade de distinção dos alvos por parte do analista, recomendado para pessoas que já tenham certo grau de experiência em identificação de objetos e certo conhecimento do uso e ocupação da área em estudo.

3.19.4 Execução da rotina do Processo de Classificação

O processo de classificação seguiu a seguinte sequência de rotinas:

1. Criar o arquivo de Contexto - este arquivo armazena quais as bandas farão parte do processo de classificação, qual o método utilizado (pixel ou região) e as amostras no caso da classificação por pixel;
2. Executar o treinamento - deve ser feita amostragens sobre uma imagem na área de desenho;
3. Analisar as amostras - permite verificar a validade das amostras coletadas;
4. Executar a Classificação - de posse das amostras e das bandas escolhidas a imagem é classificada;
5. Executar o Mapeamento para Classes - permite transformar a imagem classificada (categoria Imagem) para um mapa temático raster (categoria Temática).

Os seguintes classificadores foram escolhidos para a classificação da imagem: MAXVER, Kmedias, Distância Euclidiana e MAXVER-ICM.

Para o classificador MAXVER foram escolhidos limiares de aceitação de 95%, 99%, 99.9% e 100% com 4, 6, 8 e 10 temas. O classificador Kmedias utiliza o mesmo número de temas e as iterações 10, 20 e 30. No caso do classificador MAXVER-ICM foram selecionadas três percentagens de mudanças (16, 95 e 100) e quatro limiares de aceitação (95, 99, 99.9 e 100).

Depois de feita classificação, foram criadas as classes vegetação arbustiva e subarbustiva, solo exposto, plantio1, plantio 2 e urbanização, a classe solo exposto por entendemos que são áreas que estão preparadas para o cultivo serão enquadradas na rotina de simulação do SWAT como áreas de Agricultura dois.

Para diminuir a confusão entre classes, ou seja, reduzir a sobreposição entre as distribuições de probabilidades das classes foram feitas aquisições de amostras significativas de alvos distintos e a avaliação da matriz de classificação das amostras.

Depois de elaborado as distintas classificações obteve-se a Tabela 13, está inserido o classificador MAXVER com diferentes limites de aceitação, Kmedias com diferentes números de temas e processos de iterações, MAXVER-ICM com variações no linear de aceitação no intervalo de classes e processo de Distância Euclidiana. Estes modelos de classificação sofreram um processo de análise qualitativa para verificar de forma visual qual classificador gerou um maior índice de exatidão na determinação das diferentes classes da imagem, para tanto foram selecionados aleatoriamente 10 pontos de controle e comparados com a imagem real onde se gerou a seguinte qualificação, Ruim de um a três acertos pelo classificador, Bom de quatro a sete e Muito bom de oito a dez, sendo a escolha feita visualmente. Dentre as melhores classificações (Muito bom), que foram três, selecionou-se aquele que visualmente forneceu a melhor identificação e diferenciação entre classes.

Tabela 3 – Resultado da análise de qualidade de cada modelo de classificação

Modelo Classificação	Qualidade do Classificador
MAXVER - limiar de aceitação 95%	Bom
MAXVER - limiar de aceitação 99%	Bom
MAXVER - limiar de aceitação 99,9%	Ruim
MAXVER - limiar de aceitação 100%	Bom
K medias 4 temas-10 iterações	Bom
K medias 6 temas -10 iterações	Ruim
K medias 8 temas -10 iterações	Bom
K medias 10 temas -10 iterações	Ruim
K medias 4 temas -20 iterações	Bom
K medias 6 temas -20 iterações	Bom
K medias 8 temas -20 iterações	Bom
K medias 10 temas -20 iterações	Ruim
K medias 4 temas -30 iterações	Ruim
K medias 6 temas -30 iterações	Ruim
K medias 8 temas -30 iterações	Bom
K medias 10 temas -30 iterações	Ruim
Distância Euclidiana	Bom

MAXVER-ICM 16 – 95 (limiar de aceitação)	Ruim
MAXVER-ICM 16 – 99 (limiar de aceitação)	Ruim
MAXVER-ICM 16 - 99,9 (limiar de aceitação)	Bom
MAXVER-ICM 16 – 100 (limiar de aceitação)	Muito bom
MAXVER-ICM 95 – 95 (limiar de aceitação)	Ruim
MAXVER-ICM 95 – 99 (limiar de aceitação)	Bom
MAXVER-ICM 95 – 99,9 (limiar de aceitação)	Bom
MAXVER-ICM 95 – 100 (limiar de aceitação)	Muito bom
MAXVER-ICM 100 – 95 (limiar de aceitação)	Ruim
MAXVER-ICM 100 – 99 (limiar de aceitação)	Bom
MAXVER-ICM 100 – 99,9 (limiar de aceitação)	Bom
MAXVER-ICM 100 – 100 (limiar de aceitação)	Muito bom

Os critérios utilizados para a qualidade da classificação foram a capacidade de distinção entre os principais alvos, menor índice de confusão entre classes e o nível de detalhes nas imagens.

Para ser feita a classificação foram selecionadas amostras de vegetação arbustiva e subarbustiva, solo exposto, plantio 1 e plantio 2 e urbanização. O processo de classificação escolhido foi o Maxver-ICM 95 (% mudança) 100 (limiar de aceitação). Por possuir a melhor classificação dentro do necessário para a realização do trabalho.

Na primeira análise de classificação identificaram-se nove usos e ocupações do solo, porém em função da dificuldade dos algoritmos realizarem a distinção das nove classes realizou-se o agrupamento de classes onde floresta densa aquela que apresenta o dossel florestal praticamente fechado pelas copas foi agrupada junto com floresta rala onde as copas não se tocam, conforme figura nove.

Para a classe solo exposto inicialmente identificou-se três tipos com respostas espectrais distintas, onde os componentes físicos e químicos, presença de água e materiais agregados geraram esta distinção. Estas três classes foram transformadas em uma conforme figura oito, e esta em função de entender-se que estes solos expostos eram áreas que estavam sendo preparadas para plantio foram atribuídas à classe plantio um posteriormente na rotina do simulador.

O plantio apresenta certo nível de complexidade, pois, existem muitas variáveis que podem fazer com que uma mesma cultura apresente uma resposta espectral diferenciada e culturas diferentes se apresentem semelhantes, principalmente no estado inicial de germinação, além do estado de crescimento da planta que dificulta a identificação sem visita *in locu*, como no presente estudo a área é extremamente grande, não se torna viável deslocar-se a todas as áreas onde se tenha dúvida em relação ao tipo de cultura, para simplificar o processo determinamos as áreas de plantio em um e dois em função de sua resposta espectral conforme figura 10 que será mais adiante caracterizada pelo simulador SWAT.

Realizou-se a determinação do valor médio de brilho de pixel para uma resolução radiométrico de oito bits para o comprimento de onda do azul, verde e vermelho, para cada um dos usos do solo, conforme resultado obtido na tabela quatro que demonstra um bom indicativo, pois, não houve conflito radiométrico de classes.

Conforme o índice de desempenho calculado pelo aplicativo após a união das classes, o algoritmo teve um índice de acerto de 100%, acima dos 95% tolerável, apresentado na figura 11.

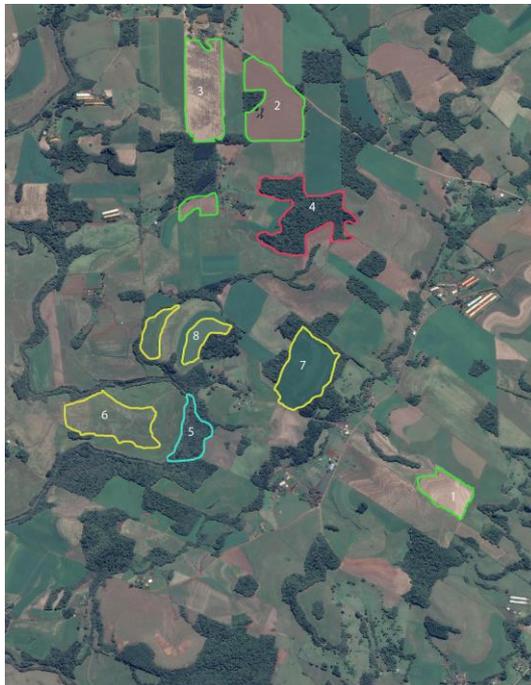


Figura 10 - Diferentes tipos de uso do solo.

Tabela 4 - Valor médio de brilho de pixel por classe.

USO DO SOLO	Vermelho	Verde	Azul	Média f do pixel
Floresta Densa	60	59	57	59
Floresta Rala	135	138	133	135
Urbanização	186	163	162	170
Solo Exposto 1	179	157	146	161
Solo Exposto 2	143	111	110	121
Solo Exposto 3	167	150	137	151
Agricultura 1	138	122	116	125
Agricultura 2	64	98	99	87
Agricultura 3	66	119	111	99

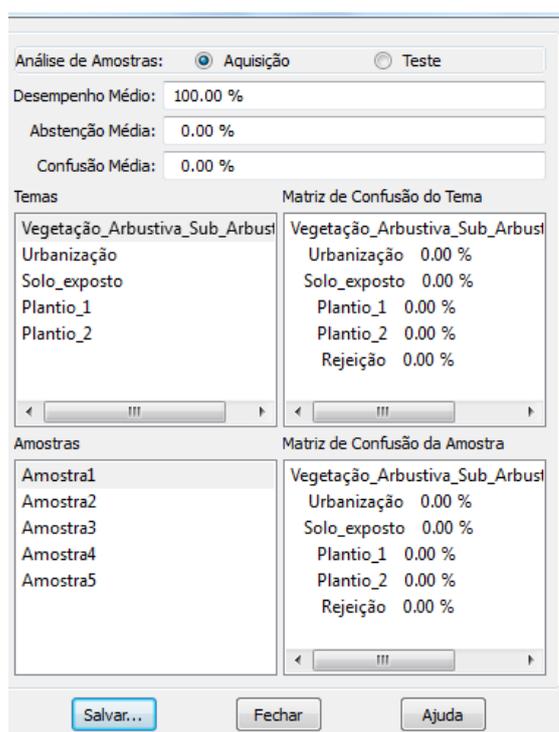


Figura 11 - índice de desempenho médio na seleção das classes.

Obteve-se a imagem classificada com o algoritmo que realizou o melhor desempenho, MAXVER-ICM 100%, gerando-se a partir desta o mapa de uso e ocupação do solo que será utilizado no simulador hidrológico SWAT, conforme figura 10.

MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA GUAPORÉ -RS-

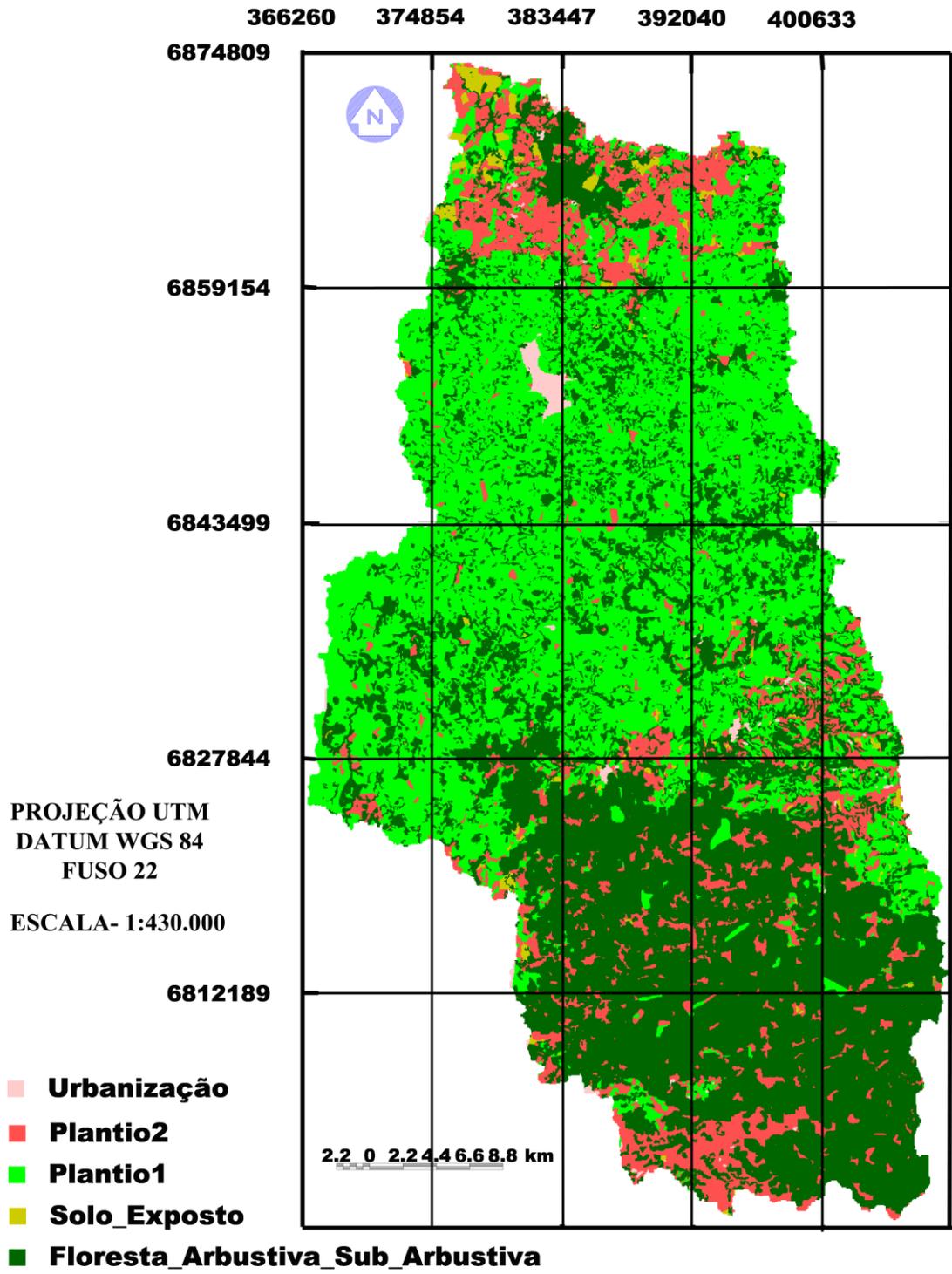


Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo Bacia Guaporé

Após a classificação da imagem, obtivemos os seguintes resultados de cálculo em relação à determinação do tamanho das áreas conforme tabela 5.

Tabela 5 - Uso e ocupação e respectivas áreas calculadas.

<i>Uso e ocupação</i>	Tamanho em Km²
Floresta_ Arbustiva_	879.4
Subarbustiva	
Urbanização	33.2
Agricultura1	785.9
Agricultura2	280.3
Solo Exposto	41.2
TOTAL	2.020,00

3.19.5 Alteração da Resolução Espacial da Imagem Classificada

O processo de alteração da resolução espacial foi realizado para as imagens de curvas de nível, solos, uso e ocupação, conforme objetivo estabelecido na presente tese deve-se gerar estas nas diferentes resoluções espaciais propostas, para analisarmos seus resultados na aplicação das simulações de vazão líquida e transporte de sedimentos no simulador SWAT, sendo estas de 10, 30, 50, 100 e 200 metros.

Esta rotina é gerada através de um processo de interpolação espacial é uma técnica usada para a espacialização de dados pontuais, visando a obtenção de modelagem de mapas

Landim (2003) realizaram estudos comparativos entre um interpolador exato, o IDW, e um geoestatístico, a Krigagem, detectando superioridade da abordagem geoestatística, este apresenta uma descrição e avaliação do desempenho de diversos algoritmos matemáticos para estimativa espacial da precipitação, enfatizando a influencia de erros provenientes de interpolações para a simulação hidrológica.

Optamos no presente trabalho pelo Interpolador de Krigagem, para realizarmos o processo de interpolação selecionamos o aplicativo ArcGis, onde executa-se três rotinas básicas.

a- Conversão da imagem raster, composta por pixels em uma função $f = (x, y)$, onde f representa o fator de brilho e x, y a coordenada de tela do pixel na matriz de visualização, para pontos através das funções no módulo de conversão.

b- Após as imagens convertidas seleciona-se a rotina de ferramentas de sistema de análise, onde insere-se os pontos e seleciona-se o interpolador de Krigagem, devemos especificar a resolução de saída do produto imagem, no presente trabalho como pré-determinada as resoluções de 10, 30, 50, 100 e 200 metros, devemos ter atenção para que fique selecionado a opção do tipo de campo com o identificador de código no formato Grid.

c - A etapa se finaliza rodando a rotina e gerando a imagem com as resoluções predefinidas.

Este processo deverá ser repetido para a imagem de curva de nível, e para solos.

3.20 Elaboração do Mapa de Solos

Este sofreu distintos processos para sua elaboração, quanto ao mapa de solos de Guaporé, trata-se de uma generalização cartográfica de um mapa original elaborado com base no levantamento de reconhecimento de solos do RS realizado pelo IBGE, em 1973, adaptado pelo Departamento de Solos da UFRGS em 2005, e atualizado pelo setor de solos da UFSM em 2011, este sofreu processo de Georreferenciamento para demarcarmos a posição exata do exultório.

Executou-se algumas rotinas dentro do sistema de informação geográfico Arc Gis8.3 que consta da geração do banco de dados de solos, com informações pertinentes as classes identificadas na área em estudo, sendo estas, Chernossolo, Latossolo, Argissolo, Neossolo e Luvissolo.

Realizou-se o georreferenciamento do mapa atualizado e sobrepõe-se a máscara shape do arquivo delimitante da bacia hidrográfica, este determinou a área de corte que representa a bacia de Guaporé do presente projeto, finalizando inseriu-se os elemento básicos que fazem parte de um mapa como título, legenda, escala orientação e grade de coordenadas, no presente projeto UTM e datum WGS84, gerando-se como produto o Mapa de Solos da Bacia Guaporé, de acordo com a figura 13.

Finalizou-se o processo com o cálculo de área executado pela rotina do sistema de informação geográfico, este quantificou o total das áreas em Km², conforme tabela seis.

Tabela 6 - Resultado do cálculo solos e respectivas áreas calculadas

<i>Tipo de Solo</i>	Área Km²
Chernossolo	502,8
Latossolo	497,20
Argissolo	268,7
Neossolo	189,6
Luvissolo	561,7
TOTAL	2.020,00

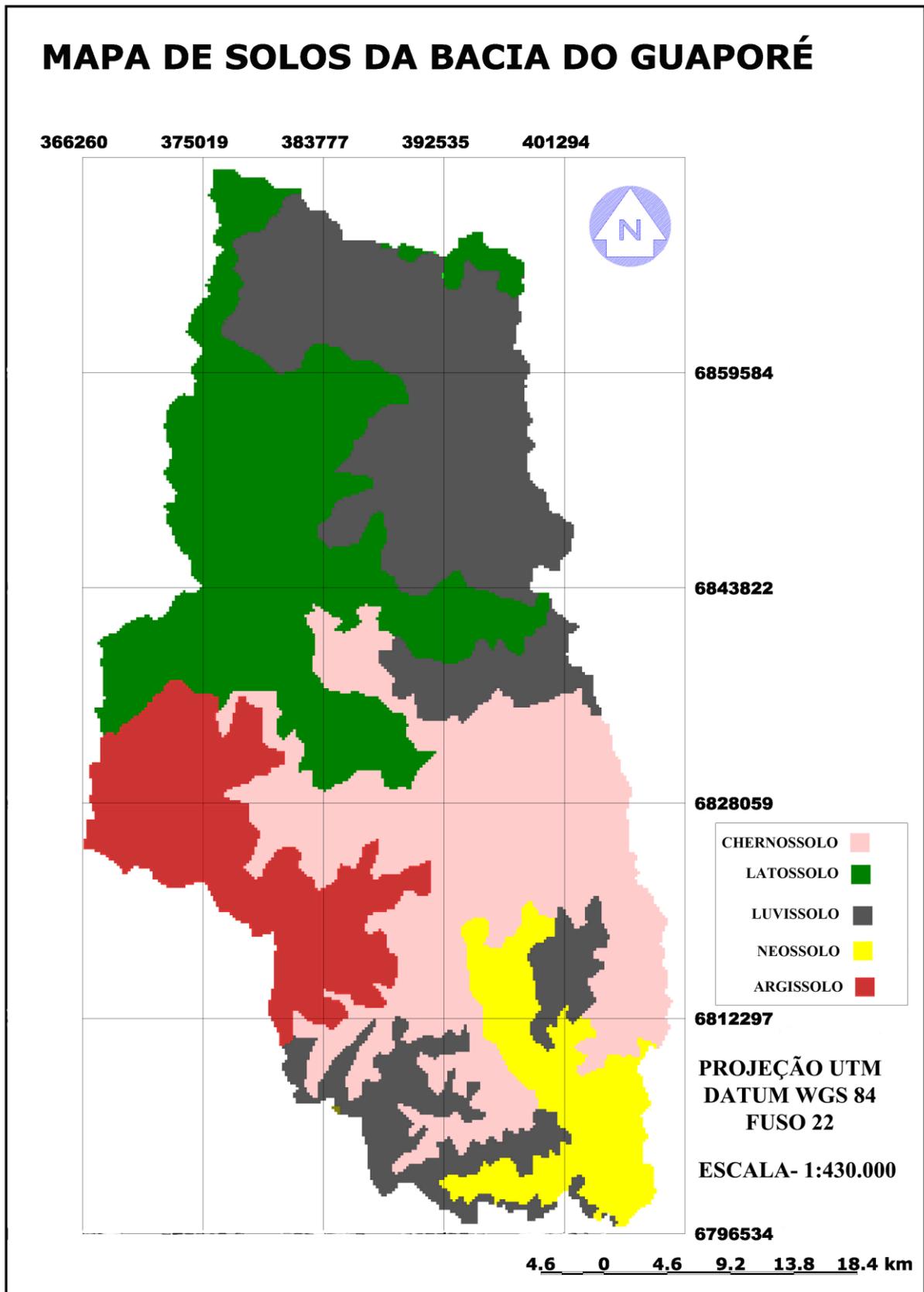


Figura 13 - Mapa de solos da Bacia do Guaporé-RS.

3.21 Dados planilhados para abastecimento do banco de dados

Os dados a serem planilhados deverão abastecer o banco de dados do SWAT para realizar as rotinas de simulação, estes se dividem em dois tipos solos e climáticos:

3.21.1 Parâmetros de solos

3.21.1.1 Aporte de Sedimentos

Estudamos através do simulador a propagação de sedimentos e água, temos o escoamento superficial denominada de SURQ, que está relacionado ao volume de água infiltrado e o escoado na superfície, quando este alcança o canal temos a fase do canal com a vazão líquida denominada de FLOW_OUT e a produção de sedimento SED_OUT, estima-se o aporte de sedimentos através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE a qual se baseia na Equação Universal de Perda de Solo – USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1965).

As equações diferem pela substituição do fator energia cinética da chuva (R) da USLE por um fator de escoamento (TUCCI, 2002), gerado com base no volume escoado e na vazão de pico. Essa alteração permite prever o aporte de sedimentos em pequenas e médias bacias hidrográficas por meio de análises de eventos individuais. Assim, o SWAT utiliza a MUSLE para calcular o aporte de sedimentos em cada HRU (Unidade de Resposta Hidrológica).

Salienta-se que o objetivo da presente tese não é analisar a propagação de sedimentos em terra, SURQ, e sim no canal Sed Out. O aporte de sedimento diário é descrito pela equação abaixo, onde iremos analisar os itens que compõem a mesma:

$$\text{sed} = 11,8 \cdot (Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{hru}})^{0,56} \cdot K_{\text{USLE}} \cdot C_{\text{USLE}} \cdot P_{\text{USLE}} \cdot LS_{\text{USLE}} \cdot CFRG \quad (1)$$

onde:

sed: aporte de sedimentos diária (ton);

Q_{surf} : volume de escoamento superficial (mm H₂O ha⁻¹);

q_{peak} : vazão de pico (m³ s⁻¹);

areahr: área da unidade de resposta hidrológica (HRU) (ha);

KUSLE: fator erodibilidade ($0,013 \text{ ton m}^2 \text{ hr (m}^3 - \text{ton cm)}^{-1}$);

CUSLE: fator de uso e manejo do solo (adimensional);

PUSLE: fator de práticas conservacionistas (adimensional);

LSUSLE: fator topográfico (adimensional);

CFRG: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

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

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

$$Q_{\text{surf}} = 0, R_{\text{day}} \leq 0,2S$$

onde:

Q_{surf} : volume de escoamento superficial ($\text{mm H}_2\text{O ha}^{-1}$);

R_{day} : precipitação de 24 horas (mm);

S: parâmetro de retenção (adimensional).

O parâmetro de retenção varia, espacialmente, em função dos diferentes tipos de solo, uso e manejo do solo e declividade; e com o tempo, em função das alterações de umidade do solo. Esse parâmetro está relacionado com a Curva Número pela seguinte equação:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{\text{CN}} - 10 \right) \quad (3)$$

onde:

CN: valor da curva número (adimensional).

A escala da CN não é linear, variando entre um e 100; os extremos correspondem, respectivamente, a uma cobertura permeável até uma cobertura impermeável. Assim, para os valores de CN são consideradas três condições:

- CN1: corresponde à Curva Número para a condição I de umidade, situação em que os solos estão secos;
- CN2: corresponde à Curva Número para a condição II de umidade, ou seja, a situação média em que os solos apresentam a umidade correspondente à capacidade de campo, definida como a quantidade de água que o solo pode reter naturalmente quando, depois de saturado, cessa a drenagem rápida;
- CN3: corresponde à Curva Número para a condição III de umidade, situação em que os solos estão saturados.

Para calcular os valores corrigidos de CN1 e CN3, estes podem ser relacionados com o CN2 por meio das seguintes equações:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636 \cdot (100 - CN_2)]} \quad (4)$$

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

b- Vazão de Pico- O modelo utiliza o Método Racional Modificado para calcular a vazão de pico (NEITSCH et al. 2002).

$$q_{\text{peak}} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{\text{surf}} \cdot \text{Área}}{3,6 \cdot t_{\text{conc}}} \quad (5)$$

onde:

q_{peak} : vazão de pico ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

α_{tc} : fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração;

Q_{surf} : volume de escoamento superficial (mm ha^{-1});

Área: área da bacia (km^2);

t_{conc} : tempo de concentração da bacia (h);

c- Fator de correção de unidade- obtido pela soma do tempo do fluxo superficial (tempo necessário para que o ponto mais remoto da sub-bacia alcance o canal) e do tempo do fluxo no canal (tempo necessário para que o ponto mais remoto do canal alcance o exutório).

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

$$K_{USLE} = \frac{0,00021.M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25.(c_{soilstr} - 2) + 2,25.(c_{perm} - 3)}{100} \quad (6)$$

onde:

K_{USLE} : fator erodibilidade (0,013 ton m² hr (m³- ton cm)⁻¹);

M: parâmetro de tamanho de partícula (adimensional);

OM: porcentagem de matéria orgânica (%);

$c_{soilstr}$: código usado para classificar a estrutura do solo ($c_{soilstr}=1$ para estrutura granular muito fina; $c_{soilstr}=2$ para estrutura granular fina; $c_{soilstr}=3$ para estrutura granular média ou grossa;

$c_{soilstr}=4$ para estrutura em blocos, laminar ou massiva);

c_{perm} : código para classe de permeabilidade do solo ($c_{perm}= 1$ para permeabilidade rápida;

$c_{perm} = 2$ para permeabilidade moderada a rápida; $c_{perm} = 3$ para permeabilidade moderada;

$c_{perm} = 4$ para permeabilidade lenta a moderada; $c_{perm} = 5$ para permeabilidade lenta; $c_{perm} = 6$

para permeabilidade muito lenta) e; O parâmetro de tamanho de partícula é calculado por:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c) \quad (7)$$

onde:

M: parâmetro de tamanho de partícula (adimensional);

m_{silt} : porcentagem de silte (0,002 – 0,05 mm de diâmetro);

m_{vfs} : porcentagem de areia fina (0,05 – 0,10 mm de diâmetro);

m_c : porcentagem de argila (<0,002 mm de diâmetro).

A porcentagem de matéria orgânica pode ser calculada:

$OM = 1,72.C_{org}$ (C_{org} é a porcentagem de carbono orgânico na camada de solo analisada).

e- Fator de Uso e Manejo do Solo - expressa a relação esperada entre as perdas de solo em áreas com culturas agrícolas e vegetação, com áreas continuamente descobertas. Para solos sem vegetação sem proteção tem-se referencial igual a um, o SWAT calcula o fator de uso e manejo do solo diário através da seguinte equação:

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

onde:

$C_{USLE,nn}$ é um valor mínimo do fator de uso e manejo do solo e rsd_{surf} é a quantidade de resíduos sobre a superfície de solo (kg ha⁻¹). O valor mínimo do fator de uso e manejo do solo pode ser estimado a partir da seguinte expressão (ARNOLD & WILLIAMS, 1998).

$$C_{USLE,nn} = 1,463 \ln[C_{USLE,aa}] + 0,1034 \quad (9)$$

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

f- Fator de Práticas Conservacionistas- Relação entre a perda de solo esperada, com determinada prática conservacionista, e a obtida quando a cultura é plantada no sentido do declive. Conforme a tabela 7 está apresenta os valores adotados de P_{USLE} e os limites de comprimento de rampa para locais onde se adota práticas conservacionistas com plantio em contorno.

Tabela 7 - Valores de fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno.

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

Fonte: Neitsch et al., 2002.

Em locais onde a prática de plantio em contorno é executada simultaneamente com o plantio de faixas alternadas de diferentes culturas, a tabela oito é recomendado para a determinação do valor de P_{USLE}.

Tabela 8 - Valores de fator P e limites de comprimento de rampa com plantio em contorno e faixas alternadas de diferentes culturas.

Declividade(%)	P _{USLE} ¹			Faixa (m)	Comprimento máximo (m)
	A	B	C		
1 - 2	0,30	0,45	0,60	40	244
3 - 5	0,25	0,38	0,50	30	183
6 - 8	0,25	0,38	0,50	30	122
9 - 12	0,30	0,45	0,60	24	73
13 - 16	0,35	0,52	0,70	24	49
17 - 20	0,40	0,60	0,80	18	37
21 - 25	0,45	0,68	0,90	15	30

¹P_{USLE}A: para rotação de cultura com e 2 anos de pousio;

¹P_{USLE}B: para rotação de cultura e 1 anos de pousio;

¹P_{USLE}C: para faixas alternadas anuais de cultura.

Fonte: Neitsch et al. 2002.

g - Fator Topográfico: Este é um dos fatores mais influenciados pela resolução espacial do pixel, os parâmetros L e S são apresentados em conjunto e denominados “Fator Topográfico”. O comprimento do declive (L) representa a relação de perdas entre um declive de comprimento qualquer e um declive de 22,1 m de comprimento do mesmo solo, mesmas características de chuva, mesmo grau de inclinação e sob mesmas condições de manejo. Grau

do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, para as mesmas condições. O fator topográfico é calculado:

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22,1} \right)^m \cdot (65,41 \cdot \text{sen}^2(\alpha_{hill}) + 4,56 \cdot \text{sen}\alpha_{hill} + 0,065) \quad (10)$$

onde:

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

O termo exponencial, m , é obtido através da expressão:

$$m = 0,6 \cdot (1 - \exp[-35,835 \cdot slp]) \quad (11)$$

onde slp é a declividade da unidade de resposta hidrológica (HRU) expressa em m m⁻¹. A relação entre α_{hill} e slp é:

$$slp = \tan\alpha_{hill} \quad (12)$$

O comprimento de rampa (L_{hill}) é a distância máxima entre os extremos da HRU e a declividade (slp) é simplesmente a relação entre esse comprimento de rampa e a diferença de altimetria nos extremos da HRU, podem-se prever falhas na estimativa do aporte de sedimentos, pois essa é uma forma muito generalista de cálculo desse fator, podendo conduzir a superestimacões devido a não consideração das variações do relevo.

h- Fator de Fragmentação Esparsa

O fator de fragmentação esparsa é calculado através da seguinte expressão:

$$CFRG = \exp(-0,053 \cdot rock) \quad (13)$$

onde, $rock$ é a porcentagem de rochas na primeira camada de solo (%).

3.21.1.2 Retardo dos Sedimentos do Escoamento Superficial

Em grandes bacias, que é a situação da presente tese, com tempo de concentração maior que um dia, somente parte do escoamento superficial chega ao canal principal no mesmo dia, onde o fator intensidade e duração das chuvas, capacidade de infiltração dos solos são fatores determinantes, o SWAT dispõe uma rotina de armazenamento de escoamento superficial para retardar a chegada de uma parte desse escoamento ao canal principal em conjunto com os sedimentos.

A quantidade de sedimento que é disponibilizada para o canal principal é calculada pela seguinte equação:

$$sed = (sed + sed_{stor,i-1}) \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (14)$$

onde:

sed: quantidade de sedimento entregue no canal principal durante um dia (ton);

sed: quantidade de sedimento gerada na HRU durante um dia (ton);

sed_{stor,i-1}: sedimento retardado no dia anterior (ton);

surlag: coeficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional);

t_{conc}: tempo de concentração da HRU (h).

O termo matemático presente na fórmula $1 - \exp(-surlag / t_{conc})$ representa a fração do total de sedimentos disponível que alcança o canal principal em um dia. Apresenta-se na figura 14 a plotagem dos resultados da expressão para diferentes valores de *surlag* e *t_{conc}*.

Deve-se ter um cuidado especial com o parâmetro Surlag no simulador SWAT, este sendo indicado através da análise de sensibilidade como prioritário no processo de calibragem.

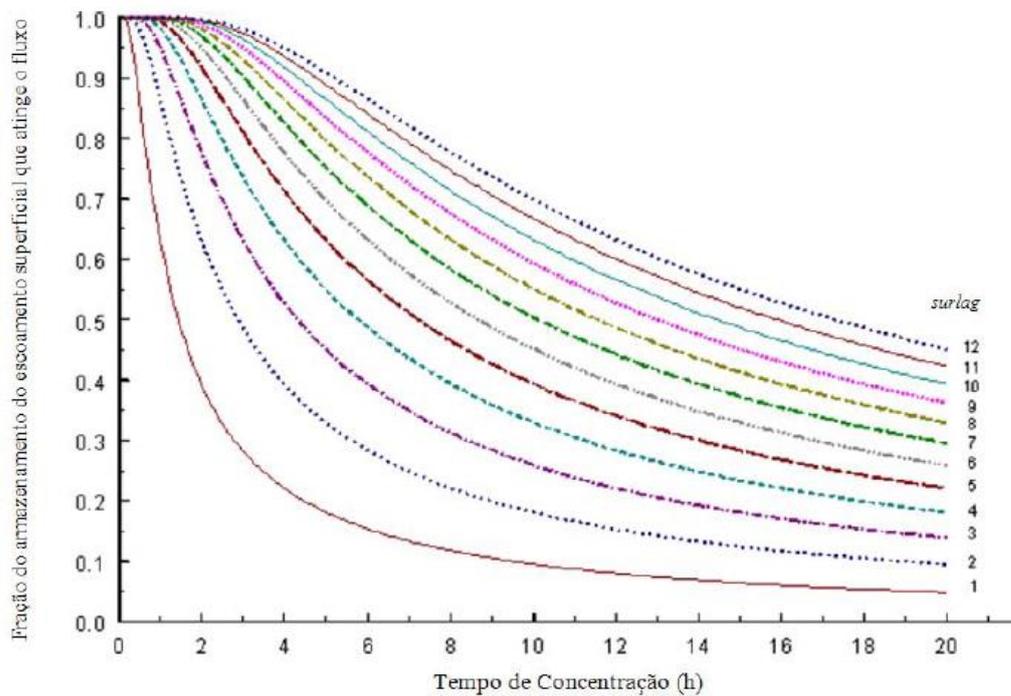


Figura 14 - Influência dos valores de surlag e tconc na fração do escoamento superficial e armazenamento de sedimentos

Fonte: NEITSCH et al. (2002)

Talita (2009) coloca que o tempo de concentração e a surlag decrescem em valor quanto maior é o armazenamento de sedimentos.

3.21.1.3 Sedimentos do Escoamento Lateral e Subterrâneo

São atribuídos ao canal principal, calculada pela seguinte forma:

$$sed_{lat} = \frac{(Q_{lat} + Q_{gw}) \cdot area_{hru} \cdot conc_{sed}}{1000} \quad (15)$$

onde:

sed_{lat} : sedimento transportado pelo escoamento superficial e subterrâneo (ton);

Q_{lat} : escoamento sub-superficial lateral de um dia (mm H₂O);

Q_{gw} : escoamento subterrâneo de um dia (mm H₂O);

$area_{hru}$: área da HRU (km²);

$cons_{sed}$: concentração de sedimentos no escoamento lateral e subterrâneo (mg L⁻¹).

3.21.1.4 Propagação dos Sedimentos no Canal

Divide-se em dois processos, agradação (deposição) e degradação (erosão), a quantidade máxima de sedimento que pode ser transportada em um segmento é função da velocidade de pico no canal:

$$v_{ch, pk} = \frac{q_{ch, pk}}{A_{ch}} \quad (16)$$

onde:

$v_{ch, pk}$ é a velocidade de pico (m s⁻¹)

$q_{ch, pk}$ é a vazão de pico (m³ s⁻¹),

A_{ch} é a área da seção do canal (m²).

A vazão de pico é definida como:

$$q_{ch, pk} = prf \cdot q_{ch} \quad (17)$$

Onde:

prf um fator de ajuste da vazão de pico, é determinado pelo usuário, podendo ser estimado a partir da relação entre a vazão de pico medida e a média das vazões monitoradas no canal. Seu valor pode variar entre 1,0 e 2,0.

e q_{ch} é a vazão média do canal (m³ s⁻¹).

A quantidade máxima de sedimento que pode ser transportada na seção é determinada pela seguinte expressão matemática.

$$CONC_{sed,ch,mx} = C_{sp} \cdot V_{ch,pk}^{spexp} \quad (18)$$

onde:

$concsed,ch,mx$, concentração máxima de sedimentos transportado pela água (ton m⁻³).

vch,pk é a velocidade de pico (m s⁻¹).

csp e $spexp$ valores definidos pelo usuário, $spexp$ varia entre 1 e 2.

Se a concentração máxima de sedimentos for menor que a concentração de sedimentos no início do processo, a deposição é o processo dominante, utiliza-se a seguinte equação.

$$sed_{dep} = (conc_{sed,ch,i} - conc_{sed,ch,mx}) \cdot V_{ch} \quad (19)$$

onde:

$seddep$, quantidade de sedimentos depositados no segmento do canal (ton),

$concsed,ch,i$, concentração de sedimentos no início do processo (ton m⁻³),

$concsed,ch,mx$, concentração máxima de sedimentos transportado pela água (ton m⁻³)

Vch é o volume de água que passa no segmento (m³).

No entanto se a concentração máxima de sedimento for maior que a concentração de sedimento no início do processo, a degradação é o processo dominante, utilizando-se a seguinte equação.

$$sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,i}) \cdot V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH} \quad (20)$$

onde:

$seddeg$ é a quantidade de sedimentos degradada (ton).

$concsed, ch, mx$ é a concentração máxima de sedimentos transportado pela água (ton m⁻³),

$concsed_{ch,i}$ é a concentração de sedimentos no início do processo (ton m^{-3}),

V_{ch} é o volume de água que passa no segmento (m^3),

KCH é o fator de erodibilidade do canal ($\text{cm h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$).

CCH é o fator de cobertura do canal (adimensional).

Depois de finalizado o cálculo entre a situação de deposição e erosão dos sedimentos, o modelo estima a quantidade de sedimentos que se propaga no trecho através da equação 21.

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (21)$$

Onde:

sed_{ch} , quantidade de sedimentos em suspensão no canal (ton)

$sed_{ch,i}$, quantidade de sedimentos no início do processo no segmento (ton)

sed_{dep} , quantidade de sedimentos depositado no segmento do canal (ton)

sed_{deg} , quantidade de sedimentos degradada (ton).

$$sed_{out} = sed_{ch} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (22)$$

onde:

sed_{out} , quantidade de sedimentos transportada para fora do segmento (ton),

sed_{ch} , quantidade de sedimentos em suspensão no canal (ton),

V_{out} é o volume de água que sai do segmento no intervalo de tempo considerado

V_{ch} o volume de água que passa no segmento (m^3).

3.21.1.5 Características físico hídricas dos solos

Para o modelo estar apto a realizar as simulações devemos entrar com as informações em um banco de dados de solos a ser criado dentro do módulo do Editor do SWAT com as seguintes informações das características físicas hídricas de cada classe de solo: grupos de saturação (HYDGRP), profundidade de raiz (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), capacidade de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K ou MUSLE) albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN), e percentagem de argila, silte, areia e seixo, dados estes que deverão ser extraídos a campo e bibliografias existentes.

1- NLAYERS: Representa o número de horizontes

2- HYDGRP: O U.S. Natural Resource Conservation Service, 1986, classificou os solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) levando em consideração os valores de condutividade hidráulica (mm/h) de cada classe de solo nos seus distintos horizontes, onde:

Grupo A - Alta taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada >150 mm/hr.

Grupo B - Moderada taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 5 e 150 mm/hr.

Grupo C - Baixa taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/hr.

Grupo D - Baixíssima taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada menor 1mm/hr.

3- SOL_ZMX. É a profundidade máxima de solo que a raiz alcança deverão ser levantados dados a campo ou através de bibliografia, quando não ocorre à entrada de dados o simulador assume que as raízes podem se desenvolver por toda a profundidade da camada do solo.

4- ANION_EXCL: Fração de porosidade do solo, determinada a campo, é composta pela relação entre o volume ocupado pelos poros e o volume total do solo (REICHARDT, 1990), a fração de porosidade foi estimada através da densidade do solo, o modelo SWAT apresenta um valor padrão de 2,65 g/cm³ para a densidade das partículas, podendo ser adotada nos casos em que não haja dados para a classe de solo.

5- SOL_Z: É a profundidade de cada horizonte em mm, medida a campo e utilizado dados já levantados na bibliografia.

6- SOL_BD: Trata da densidade do solo em g cm⁻¹, a densidade das partículas na presença de ar, calculada através do levantamento de campo, ou adotando-se valores tabelados.

7- SOL_AWC: Representa a capacidade de água no solo em mm mm^{-1} , ou seja quantidade de água disponível para as plantas, obtém subtraindo o conteúdo de água na capacidade de campo ((FC) umidade que um dado solo sustenta sob a ação da gravidade, na prática a umidade da amostra de solo quando submetida a uma tensão de 0.033 MPa)) da capacidade de água no ponto de murcha (WP) que é a umidade do solo na qual as plantas não mais conseguem manter suas folhas túrgidas, é a quantidade de água retida no solo em uma tensão de 1.5 MPa.

A quantidade de água retida no solo (SOL_AWC) é uma relação entre a capacidade do campo e o ponto de murcha permanente é considerado a água disponível para a extração da planta.

8- SOL_K: Condutividade hidráulica saturada mm h^{-1} , medido em campo, ou da tabela adaptada por Dent & Young (1981), que relaciona a textura e a estrutura do solo com a condutividade hidráulica.

9- CLAY: Representa a percentagem de argila no solo, As percentagens de argila, silte, areia e seixo foram classificados de acordo com o USDA, (United States Department of Agriculture), coletas a campo ou bibliografias para esta classificação.

10- SILT: Representa a percentagem de silte no solo.

11- SAND: Representa a percentagem de areia no solo.

12- ROCK: Representa a percentagem de cascalho no solo

13- USLE_K ou MUSLE: Fator de erodibilidade do solo, $0,013 \text{ ton m}^2 \text{ hr (m}^3 - \text{ton cm)}^{-1}$).

Para a estimativa de erodibilidade (KUSLE) que expressa a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, Williams 1995 a equação 23.

$$\text{KUSLE} = fcsand * fcl-si * forgc * fhisand \quad (23)$$

Onde:

fcsand – fração de solos com alto conteúdo de areia grossa;

fcl-si – fração de solos com alta razão de silte e argila;

forgc – fração de solos com alto conteúdo de carbono orgânico;

fhisand – fração de solos com conteúdo extremamente alto de areia;

Equação Universal de Perda de Solo (USLE) foi um grande avanço na modelagem. A versão revisada da USLE ou RUSLE, foi desenvolvida pelo Departamento Norte Americano

de Agricultura, este necessita uma pequena quantidade de dados para gerar análises determinando as perdas de solo.

14- SOL_ALB: Albedo do solo, a energia de refletância emitida ao atingir a superfície do solo, sofrendo variações em função de sua cobertura vegetal, em uma mesma região agrícola pode ocorrer variações de acordo com a fase do ciclo de cultivo, entre o solo lavrado, recém-semeado, praticamente nu, e a fase de crescimento e maturação.

Pode-se estimar este a campo ou em estações meteorológicas próximas.

15- SOL_CBN: Conteúdo de carbono orgânico no solo, percentagem de solo, realizados levantamentos a campo, ou bibliografias, caso ocorra à falta de dados pode ser estimado, através do percentual de matéria orgânica (MO) do solo onde se divide este valor por 1,72.

Os fatores de solos foram determinados para chernossolo, latossolo, luvisolo, neossolo, argissolo, estes foram inseridos no banco de dados do SWAT para serem utilizados na rotina de simulação hidrológica, conforme tabela nove.

Tabela 9 - Banco de dados de solo gerado no SWAT

<i>Parâmetros</i>	<i>Argissolo</i>	<i>Chernossolo</i>	<i>Latossolo</i>	<i>Luvisolo</i>	Neossolo
NLAYERS	1	1	1	1	1
HYDGRP	A	A	B	B	A
SOL_ZMX	300 mm	300	800	320	300 mm
ANIONEXCL	0,560	0,570	0,380	0,350	0,547
SOL_Z	300 mm	300	800	320	300 mm
SOL_BD	1,10 ccm ⁻³	1,32	1,50	1,66	1,10 ccm ⁻³
SOL_AWC	0,17 mm mm ⁻¹	0,15	0,15	0,175	0,19
SOL_K	293,01 mm h ⁻¹	432,43	407,00	183,6	236,03
SOL_CBN	2,80%	2,24	1,10	1,36	2,49
CLAY	31,37%	26,50	30,30	40,0	22,68
SILT	43,02%	25,75	16	20,0	49,23
SAND	25,61%	52,75	53,7	53,0	28,09
ROCK	17,13%	9,25	13,00	12,00	21,7
SOL_ALB	0,09	0,13	0,15	0,17	0,15
USLE_K	0,32	0,16	0,13	0,15	0,37

3.22 Fatores Climáticos inseridos no SWAT

O SWAT trabalha com dois tipos de dados climáticos que serão tratados separadamente, o primeiro trata-se das informações requeridas para elaboração do banco de dados do simulador hidrológico WXGEN, sendo estes precipitação diárias, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade dos ventos, umidade relativa e o segundo são os dados diários coletados nas estações climáticas, estes apresentando falhas que serão preenchidas pelo gerador climático.

3.23 Dados médios a serem preenchidos no simulador climático (WXGEN).

Os dados climáticos para entrada no SWAT foram coletados em três estações meteorológicas denominadas de 289-522, 286-522 e 283-522, disponibilizados na página da ANA (Agência Nacional das Águas) com as coordenadas demonstradas na tabela 10. A distribuição destas estações apresentou certa uniformidade espacial o que tornou os dados coletados mais representativos no contexto espacial e climático, conforme demonstra a Figura 15.

Tabela 10 - Localização planialtimétrica das estações.

<i>ESTAÇÃO</i>	<i>LATITUDE</i>	<i>LONGITUDE</i>	<i>ALTITUDE</i>
283-522	-28.2567	-52.1875	632,00
286-522	-28.5689	-52.1875	529,00
289-522	-28.8812	-52.1875	643,00

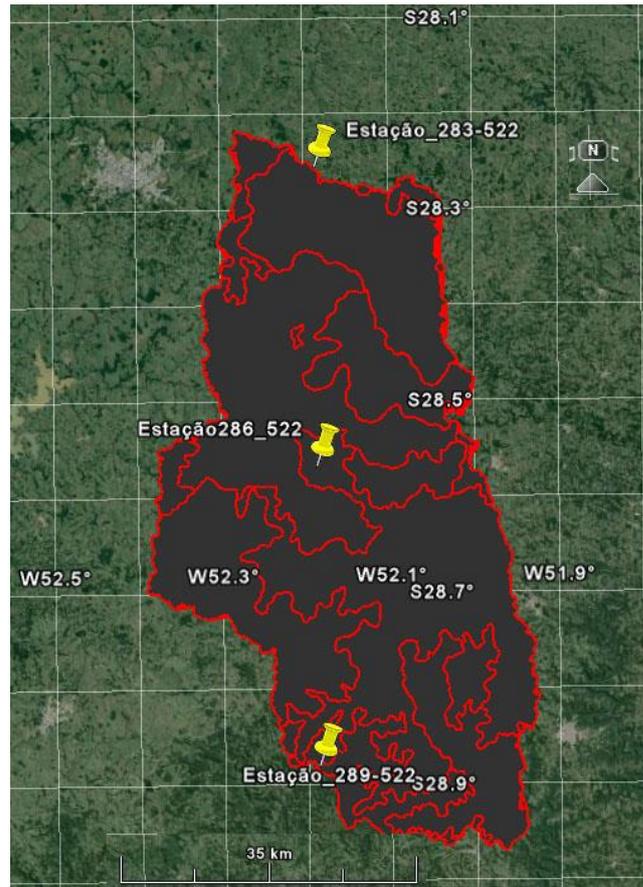


Figura 15 - Distribuição espacial das estações.

O banco de dados do gerador climático contém dados médios necessários para elaboração de dados climáticos diários em dois momentos, quando for determinado pelo operador do sistema que estes deverão ser utilizados no processo de simulação, ou quando existe uma falha de coleta representado pelo número 99, neste caso o sistema automaticamente busca no gerador a informação para realizar o preenchimento de falhas.

A escolha das estações climáticas para abastecer de informações o gerador climático deveria seguir dois critérios para a obtenção de resultados confiáveis, ter disponível séries de dados pluviométricos superior a 10 anos e as estações estarem localizadas na mesma isozona, porém em função da dificuldade de disponibilidade de dados com séries sem falhas e de estações de coleta na bacia trabalhou-se com todas as estações disponíveis representadas por três estações, estas com intervalo de dados que inicia em 01/01/1989 até 31/12/2013, sendo 24 anos.

Para cada uma das estações foram calculados 14 parâmetros inseridos no banco de dados climático conforme tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros necessários no modelo SWAT.

WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus).
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus).
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros).
RAIN_YRS	Anos dos dados observados utilizados para calcular .
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C).
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C).
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês.
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês.
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm).
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹).
PCPSKW	Coefficiente Skew para a precipitação diária no mês.
PR_W(1)	Probabilidade dia com chuva seguido dia seco no mês.
PR_W(2)	Probabilidade dia úmido seguido dia úmido no mês.
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês.
RAINHHMX	Precipitação máxima período 30 minutos no mês (mm).
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹).
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C).
WNDVAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s ⁻¹).

Para calcularmos os parâmetros necessários utilizaram-se as equações dispostas a seguir.

a - Temperatura média máxima nos diferentes meses do ano em graus Celsius. (TMPMX)

$$\mu_{mx_{mon}} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N} \quad (24)$$

Onde:

$\mu_{mx_{mon}}$, = Média das temperaturas máximas do mês.

$T_{mx,mon}$ = Temperatura máxima do dia

N = Número total de dias.

b - Temperatura média mínima nos diferentes meses do ano em graus célsius. (TMPMN)

$$\mu mn_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N} \quad (25)$$

c - Desvio padrão da máxima temperatura no mês. (TMPSTDMX)

$$\sigma mx_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - \mu mx_{mon})^2}{N-1} \right)} \quad (26)$$

c- Desvio padrão da mínima temperatura no mês. (TMPSTDMN)

$$\sigma mn_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mon} - \mu mn_{mon})^2}{N-1} \right)} \quad (27)$$

e - Precipitação (mm). (PCPMM)

$$\bar{R}_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day,mon}}{yrs} \quad (28)$$

Onde:

R_{mon} = Total precipitação mês.

$R_{day,mon}$ = Somatório da precipitação média diária no mês.

yrs = Número de anos

f - Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia-1) (PCPSTD)

$$\sigma_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^2}{N-1} \right)} \quad (29)$$

g - Coeficiente Skew para a precipitação diária no mês (PCPSKW)

Este parâmetro quantifica a simetria das distribuições das chuvas em função da média mensal.

$$g_{mon} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^3}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot (\sigma_{mon})^3} \quad (30)$$

Onde:

N= Número total de chuvas no mês.

$R_{day,mon}$ = Total da precipitação no mês.

R_{mon} = Média da precipitação no mês.

σ_{mon} = Desvio padrão da precipitação diária no mês

h - Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês. PR_W(1).

$$P_i(W/D) = \frac{days_{W/D,i}}{days_{dry,i}} \quad (31)$$

Onde:

Days_{W/D,i} = Número dos dias de chuva seguido de dias sem chuva no mês.

Days_{dry,i} = Número de dias sem chuva no mês.

i -Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês PR_W(2)

$$P_i(W/W) = \frac{days_{w/w,i}}{days_{wet,i}} \quad (32)$$

Onde:

Days_{w/w,i} = Número dos dias de chuva seguido de dias de chuva no mês.

Days_{wet,i} = Número de dias com chuva no mês

j - Número médio de dias chuvosos no mês. (PCPD)

$$\bar{d}_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs} \quad (33)$$

Onde:

Days_{wet,i} = Número de dias com chuva no mês

yrs = Número de anos

k- Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm) (RAINHHMX)

Utilizou-se o valor percentual médio para a duração de 30 minutos de chuvas intensas para cidade de Veranópolis, obtido de Beltrame et al. (1991), multiplicado pela precipitação média mensal, obtendo-se o valor em milímetros da precipitação média para cada mês com duração de 30 minutos.

l - Radiação solar média diária no mês (MJ.m-2.dia-1) (SOLARAV)

$$\mu rad_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{day,mon}}{N} \quad (34)$$

Onde:

H_{day,mon} = Total da radiação solar diária.

N = Número de dias.

m - Temperatura no Ponto de orvalho médio diário no mês (°C) (DEWPT).

Estimou-se a temperatura no ponto de orvalho - DEWPT, em função da umidade relativa e temperatura do ar, onde umidade relativa do ar (UR%) é :

$$UR(\%) = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad e_a = \frac{UR}{e_s} \quad (35)$$

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

Para a estimativa do valor da pressão de saturação de vapor (e_s) utiliza-se a Equação Tetens:

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left[\frac{7,5 \cdot t_{ar}}{237,3 + t_{ar}} \right]} \quad (36)$$

Após termos calculado e_a e e_s determina-se a temperatura de ponto de orvalho (DEWPT).

$$DEWPT = \frac{\left[237,3 \cdot \text{Log} \left(\frac{e_a}{0,6108} \right) \right]}{\left[7,5 - \text{Log} \left(\frac{e_s}{0,6108} \right) \right]} \quad (37)$$

n - Velocidade do vento médio diário no mês (m.s-1). (WND AV)

$$\mu_{wnd}_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N \mu_{wnd,mon}}{N} \quad (38)$$

Onde:

$\mu_{wnd,mon}$ = Velocidade média dos ventos diária (m/s)

N = Número total de dias

Após todos os parâmetros calculados executa-se a rotina de inserção das informações no banco de dados do gerador climático, conforme figura 16.

Figura 16 - Tabela de inserção dos dados no Gerador Climático.

Obtendo-se após o preenchimento do banco de dados climático os parâmetros tabulados para cada uma das estações analisadas apresentados nas tabelas 12, 13, 14.

Tabela 12 - Dados climáticos calculados, Estação 289-522

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tmpmx	27.97	27.22	26.7	23.4	19.6	17.64	16	18.02	19.46	22.98	24.5	27.63
Tmpmn	15.92	16.34	15.8	13.67	10.7	9.27	7.59	9	9.81	12.72	13.7	16.07
Tmpstdmx	2.2	2.45	2.96	2.53	3.27	2.41	4.7	2.82	5.18	2.57	2.06	2.62
Ttmpstdmn	15.92	16.34	15.8	13.67	10.7	9.27	7.59	9	9.81	12.72	13.7	16.07
Pcpmm	154.7	124.1	121.6	195.2	229	197	212	137.3	203	222.0	159	117.8
Pcpstd	6.86	4.19	7.66	9.42	9.79	9.69	13.2	8.91	13.79	9.55	6.81	7.92
Pcpskw	1.01	1.2	0.96	1.31	3.29	3.07	0.9	2.66	2.74	1.56	2.57	3.06
Pr_w1	0.531	0.533	0.467	0.343	0.44	0.515	0.4	0.311	0.345	0.446	0.55	0.446
Pr_w2	0.837	0.73	0.826	0.782	0.78	0.751	0.73	0.767	0.866	0.84	0.78	0.708
Pcpd	22	20.8	21.4	20.6	22	20.1	19.4	23.2	20.2	21.4	18.6	21.2
Rainhhmx	48.08	38.59	37.79	60.67	71.3	61.22	65.8	42.67	63.1	69.02	49.3	36.63
Solarav	24.99	22.97	19.98	13.91	11.4	9.37	10.2	13.76	16.09	19.3	23.2	25.93
Dewpt	17.06	18.05	17.45	15.93	10.8	9.32	8.46	11.52	12.4	15.64	14.4	16.65
Wndav	2.64	2.48	2.46	2.66	2.89	3.24	3.34	3.27	3.13	3.16	3.05	2.92

Tabela 13 - Dados climáticos calculados estação 286-522

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tmpmx	27.93	28.31	27.98	26.7	22.96	19.19	16.1	16.02	22.3	20.5	23.58	24.8
Tmpmn	16.3	16.88	16.4	13.9	11.28	9.87	8.56	10.06	10.1	12.95	14.02	16.4
Tmpstdmx	1.93	1.25	3.61	3.25	1.47	4.01	3.39	3.29	2.84	2.62	1.37	1.78
Tmpstdmn	1.207	1.35	0.88	1.04	1.28	1.29	2.28	1.06	1.36	1.45	1.03	1.08
Pcpmm	152.1	161.6	153.4	176	166.6	233	235	133.6	163	258.4	206	129
Pcpstd	7.24	7.1	5.98	14.8	9.62	8.05	12.3	10.06	13.5	14.67	11.83	5.12
Pcpskw	0.94	1.73	0.84	1.07	1.41	2.84	2.64	1.02	2.49	2.64	1.96	2.96
Pr_w1	0.455	0.591	0.602	0.43	0.373	0.367	0.4	0.336	0.33	0.34	0.514	0.46
Pr_w2	0.749	0.845	0.742	0.81	0.796	0.771	0.74	0.815	0.81	0.889	0.785	0.75
Pcpd	20.3	22.2	20.6	18	21.4	19.8	21.8	16.6	19.2	25	21	18.2
Rainhmx	47.24	50.23	47.68	54.6	51.79	72.44	73	41.51	50.6	80.33	64.04	40
Solarav	21.36	23.82	20.17	13.6	12.15	12.03	16.3	16.36	17.5	17.76	17.1	18.2
Dewpt	16.9	18.1	16.8	14.9	11.45	11.23	8.92	11.2	12	15.26	14.94	16.5
Wndav	2.65	2.62	2.48	2.71	2.79	3.37	3.42	3.45	3.19	2.98	3.03	2.87

Tabela 14 - Dados climáticos calculados Estação 283-522

Dados	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tmpmx	27.4	26.8	26.4	23.11	19.4	17.1	15.8	18.8	19.8	22.8	24.29	27.4
Tmpmn	15.9	16.3	15.7	13.55	11	9.14	7.44	8.93	10	12.5	13.77	15.9
Tmpstdmx	0.82	1.71	1.73	1.25	1.39	1.21	1.44	0.99	2.18	1.35	0.75	2.13
Tmpstdmn	1.13	1.37	0.75	1.13	1.58	1.49	1.46	0.94	1.56	1.47	1.42	0.96
Pcpmm	158	140	134	208	231	196	213	135	206	231	167.7	131
Pcpstd	4.64	4.89	5.71	17.64	10.5	11.4	14.6	13.3	14.1	12.3	9.4	6.9
Pcpskw	0.47	1.05	1.79	0.98	3.03	2.57	0.73	2.55	2.13	1.87	2.39	2.88
Pr_w1	0.56	0.64	0.47	0.337	0.44	0.48	0.37	0.32	0.36	0.42	0.467	0.36
Pr_w2	0.84	0.76	0.84	0.829	0.76	0.79	0.76	0.75	0.88	0.81	0.76	0.79
Pcpd	24.4	20	22.2	19	18.6	22.8	20.1	19.6	21.4	26.4	23.4	21.8
Rainhmx	49.1	43.4	41.5	64.64	71.6	60.8	66.2	42.4	64.2	71.9	52.13	40.7
Solarav	24.6	22.3	19.6	13.24	11.2	9.24	10.3	13.6	15.7	18.8	22.8	25.5

Dewpt	19	19.8	18.3	16.13	11.8	10.9	9.23	11.6	11.8	14.7	15.79	18.3
Wndav	2.9	2.5	2.49	2.69	3.11	3.21	3.47	3.28	3.18	3.23	3.13	2.92

3.24 Dados diários para a simulação no modelo SWAT

Em função da grande extensão da área da bacia, 2020,00 Km² realizou-se a seleção de diversas estações climáticas para inserção de dados diários, obtidos através do site Hidroweb um servidor da Agência Nacional de Águas (ANA). Em função da presença de falhas, utilizaram-se dados de nove estações pluviométricas conforme tabela 15, estas possuem intervalos de séries temporais semelhantes, de 1/1/1989 a 30/12/2013, realizou-se uma distribuição espacial de forma que se obtenha uma boa espacialização das estações, observando-se a disponibilidade de estações e funcionalidade destas quanto a geração e armazenamento de dados climáticos, conforme demonstra a figura 17.

Tabela 15- Localização planialtimétrica das estações.

<i>ESTAÇÃO</i>	<i>LATITUDE</i>	<i>LONGITUDE</i>	<i>ALTITUDE</i>
Pch-Guaporé	-28.9003	-51.9500	539,00
Guaporé-Montante	-28.9188	-51.9514	323,00
Arvorezinha	-28.8666	-52.1833	747,00
Veranópolis	-28.9667	-51.9167	160,00
Ilópolis	-28.9167	-52.1167	689,00
Campo do Meio	-28.3264	-52.0536	689,00
Barragem Capigui	-28.3500	-52.2167	653,00
Marau	-28.4500	-52.2000	611,00
Camargo	-28.5931	-52.1919	445,00

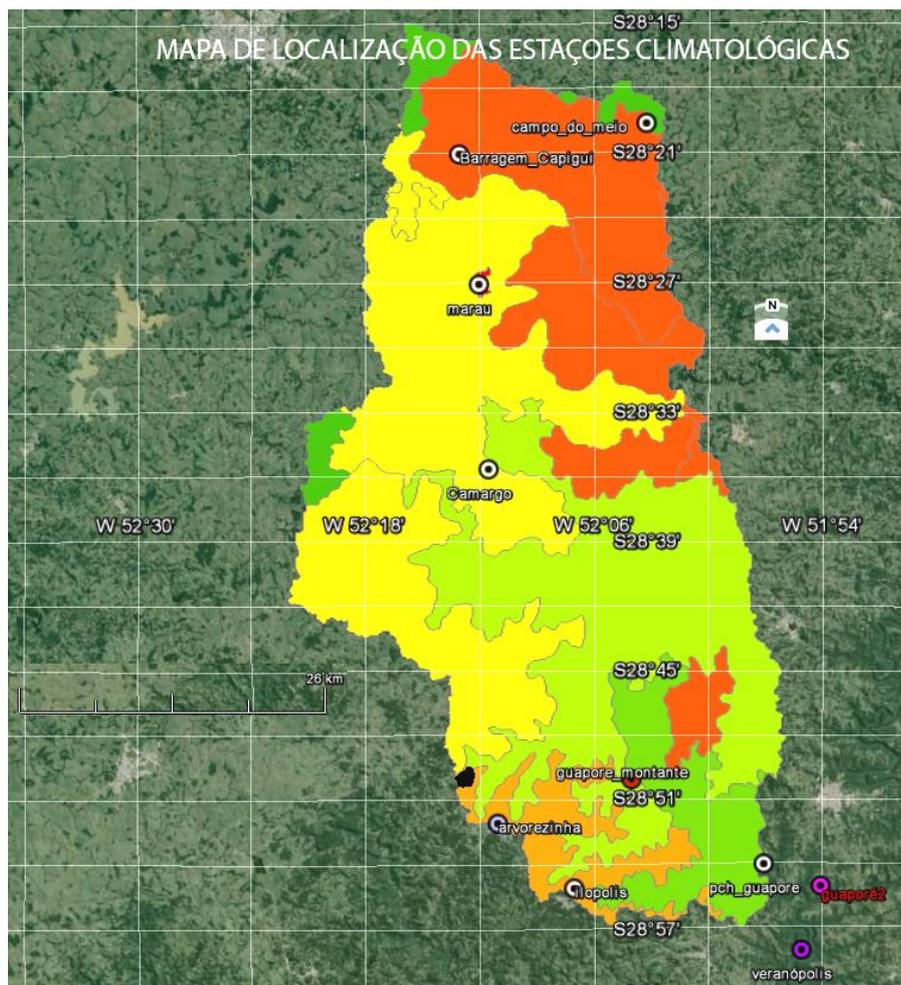


Figura 17- Localização espacial das estações para coleta de dados.

Deve-se preencher o modelo com os seguintes dados diários, precipitação (mm H₂O), temperatura máxima e mínima do ar (°C), radiação solar incidente (MJ/m².dia), velocidade do vento (m/s), e umidade relativa do ar (%), estes serão inseridos no banco de dados do projeto do SWAT, devemos para cada tipo de dado climático inserir as informações referentes a identificação da estação, nome da estação, coordenadas de latitude eixo Y e de longitude eixo X estas podendo ser no sistema UTM ou geográficas decimais, e altitude da estação, denominamos esta tabela de Master, sendo que o identificador da estação funciona como chave de localização dos dados da estação no sistema de gerenciamento do banco de dados. A seguir será descrito o processo de input dos dados climáticos.

a - Precipitação (mm H₂O), devemos gerar duas tabelas a serem inseridas no banco de dados, Master, a segunda com informações referente aos dados de somatório da precipitação

diária e a data de ocorrência, quando ocorre uma falha de coleta deve-se preencher com valor -99 para o simulador reconhecer como sendo um dia no qual os dados serão determinados pelo simulados, figura 18.

ID	NAME	XPR	YPR
1	Pch+Guaporé	-28.9003	-51.9500
2	Guaporé_Montante	-28.9188	-51.9514
3	Arvorezinha	-28.8666	-52.1833

Figura18 - Dados das estações, tabela master.

b-Temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), são inseridos as datas com a respectiva máxima e mínima temperatura medida.

c - Radiação solar incidente ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$), observa-se que os dados gerados são de insolação devendo os mesmos ser convertido em radiação, para tal usou-se Planilha para cálculo de Radiação Solar, com base na Insolação, Planilha realizada por Danielle Bressiani, com base em planilha de Francois Delobel, e fórmulas de referência em FAO (2009), FAO Drainage and Irrigation Paper No. 56, Smith (1992) e Linacre, (1992).

d- Velocidade do vento (m/s), dados de velocidade dos ventos médios medidos diariamente.

e - Umidade relativa do ar (%), dados de umidade relativa médios diários.

3.25 Rotina de execução para introduzir dados climáticos no Projeto da Bacia

Após o banco de dados ser finalizado, através do gerenciador de banco de dados deve-se introduzi-lo no projeto da bacia, indexando as tabelas no simulador climático, este irá disponibilizar duas opções uma para inserção do gerador climático denominado de base de dados customizada, onde deve-se entrar com os bancos já criados denominados de 289-522, 286-522 e 283-522, e após inserimos os dados diários de chuvas, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade dos ventos, conforme figura 19 e 20.

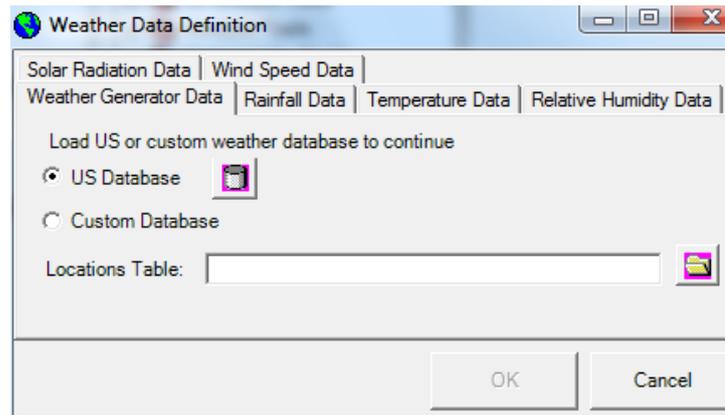


Figura 19 - Rotina de inserção dos dados de simulação no projeto.

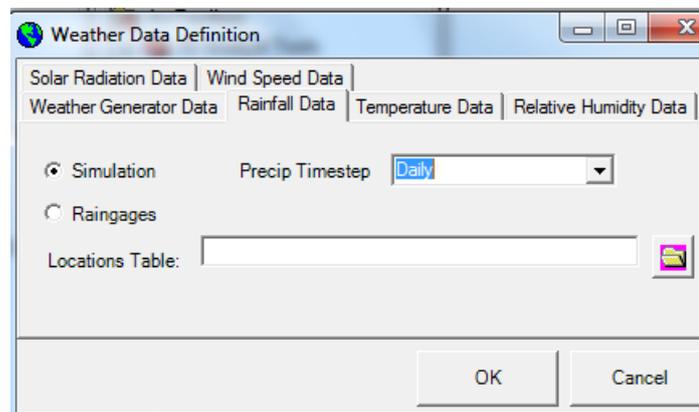


Figura 20 - Rotina de inserção dos dados diários no projeto.

Importante observar que os fatores ambientais devem possuir a mesma série temporal, pois o modelo correlaciona as estações através das tabelas com as coordenadas de localização, e gera uma única tabela para cada parâmetro climático.

3.26 Rotinas internas no SWAT

3.26.1 Inserção de dados para delimitação da bacia.

Quando se pretende trabalhar com sistemas de informação geográficos, uma das primeiras etapas a serem cumpridas é o processo de configuração geográfica do projeto, onde se deve configurar o sistema de projeção a ser utilizado, devendo-se obrigatoriamente trabalhar com projeção UTM, está um das solicitações que o simulador SWAT exige, e fornecer o fuso no qual a área se encontra para a respectiva área do projeto optou-se por utilizar o datum WGS 84 e não o SIRGAS 2000 como recomendado pelo sistema cartográfico do Brasil, pois estes apresentam-se semelhantes em seus semi eixos e fator de achatamento, além do fato que evita-se criar uma etapa a mais que seria para conversão de datum.

Trabalhamos com a seguinte configuração WGS 84, UTM zona 22S Projeção Transversal de Mercator, valor de falso leste ou meridiano central de 500.000 metros e falso norte de 10.000.000 metros, meridiano central do -22.

A fase seguinte consta da determinação das setas de direção e acúmulo de água, através deste processo, temos indicativos dos pontos de acúmulo de água e sedimentos, é possível determinar a área mínima que desejamos que seja projetada as setas através da execução da rotina de demarcação de rede de drenagem do aplicativo SWAT, deve-se observar nesta fase que a área mínima a ser estipulada consiga identificar o ponto exultório, onde ocorrera as medições, na presente tese a partir de uma área de 4028 ha teve-se uma localização deste, não sendo necessário diminuir a área, este valor foi adotado para todas as resoluções de imagens como demonstrado na tabela 14.

Em conjunto é determinado o número de células que contém esta área mínima calculada em função do tamanho de cada célula, e entenda-se célula como pixel, e este fator são influenciados diretamente pela resolução espacial que dispomos em nossa imagem raster, e aqui observamos a importância do processo de interpolar matematicamente uma imagem para obtermos uma melhor resolução espacial, pois a imagem original fornecida pela NASA apresenta uma resolução de 88 metros, ao fato que através da execução da rotina de interpolação que foram executadas nas fases anteriores, trabalhamos com resolução de 10, 30, 50, 100, 200 metros conforme demonstra a tabela 16, tornando o processo de escoamento superficial das águas mais próximo do que ocorre na realidade, em função da menor área de

atuação de cada pixel, realizaram-se alguns testes alterando-se a delimitação das áreas abrangentes pelas setas e observa-se que o aumento do número de exultórios se mantém proporcional a diminuição das áreas mínimas, chegou-se a um limite de área mínima de 1 ha, onde em função da quantidade de exultórios para o tamanho da área extrapolou a capacidade de processamento do aplicativo.

Como devemos uniformizar o processo determinou-se como a área mínima da simulação das setas um valor aproximado de 4020 ha, observando-se uma constância da determinação do número de exultórios, ocorre uma variação bastante significativa no número de pixels que compõem as áreas diretamente relacionados ao fator resolução espacial, tabela 16.

Tabela 16- Relação do tamanho da célula com o número de exultórios

<i>RESOLUÇÃO interpolação CÉLULA</i>	<i>TAMANHO CÉLULA</i>	<i>ÁREA CÉLULA</i>	<i>NÚMERO EXULTÓRIOS</i>	<i>ÁREA</i>	<i>N CÉLULAS</i>
10	10 m	0,01 ha	41	4003	400397
10	10 m	0,01 ha	65	2000	200000
10	10 m	0,01 ha	140	1000	100000
10	10 m	0,01 ha	296	500	50000
10	10 m	0,01 ha	486	250	25000
10	10 m	0,01 ha	1197	100	10000
10	10 m	0,01 ha	2187	50	5000
10	10 m	0,01 ha	10788	10	1000
30	30 m	0,09 ha	31	4020	44671
30	30 m	0,09 ha	55	2000	22222
30	30 m	0,09 ha	117	1000	11111
30	30 m	0,09 ha	223	500	6666
30	30 m	0,09 ha	419	250	2778
30	30 m	0,09 ha	1118	100	1111
30	30 m	0,09 ha	2211	50	666
30	30 m	0,09 ha	9211	10	111
50	50 m	0,25 ha	31	4028	16115
50	50 m	0,25 ha	55	2000	8000
50	50 m	0,25 ha	117	1000	4000
50	50 m	0,25 ha	220	500	2000
50	50 m	0,25 ha	414	250	1000
50	50 m	0,25 ha	1104	100	400
50	50 m	0,25 ha	2137	50	200
50	50 m	0,25 ha	10891	10	40
100	100 m	1 ha	31	4024	4024
100	100 m	1 ha	55	2000	2000
100	100 m	1 ha	115	1000	1000
100	100 m	1 ha	222	500	500
100	100 m	1 ha	404	250	250
100	100 m	1 ha	1080	100	100
100	100 m	1 ha	2024	50	50

100	100 m	1 ha	9569	10	10
200	200 m	4 ha	31	3992	1000
200	200 m	4 ha	51	2000	500
200	200 m	4 ha	113	1000	250
200	200 m	4 ha	207	500	125
200	200 m	4 ha	403	250	62
200	200 m	4 ha	1006	100	25
200	200 m	4 ha	1932	50	12
200	200 m	4 ha	9860	10	2

Após determinação das linhas de fluxos e pontos de acúmulo é possível realizar a vetorização da rede hidrográfica, observando-se que quanto menor o número de células maior nível de detalhamento estará presente na rede hídrica.

Na fase que se segue consta da demarcação do exultório na imagem, este foi identificado a campo com o GPS utilizando-se coordenadas UTM, sendo 407.106 W e 6.801.444 S no fuso 22, e demarcado sobre a imagem raster da bacia, insere-se o mesmo através de uma rotina interna do aplicativo, após partimos para o processo automatizado no qual o aplicativo SWAT em função da seleção do exultório na rede hidrológica vetorizada, determina os divisores de água e delimita os limites da bacia, e calculando seus parâmetros, e determinando o número total de exultórios e sub-bacias, após é gerado um relatório de cada sub-bacia com seu tamanho elevação máxima e mínima e desvio padrão.

3.26.2 Delimitação das HRU (Unidades de Resposta Hidrológicas)

Conforme Paiva (2009), os primeiros processos de análise hidrológica apresentavam resultados discreteados e interpretavam de forma individual: precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração, escoamentos em rios, canais e lagos, com a simulação computacional, unificando os processos gerando resultados mais condizentes com a realidade.

Nos primeiros processos de simulação em bacias hidrográficas trabalhava-se com valores médios sobre esta, o que em muitas situações não representava a realidade das características físicas da bacia, principalmente em grandes bacias, como exemplo Guaporé.

As bacias foram subdivididas considerando sub-bacias de tamanhos menores, onde em cada sub-bacia as características eram consideradas uniforme, sendo também um processo de abstração e generalização da informação na bacia, ocorre que mesmo em sub-bacias o comportamento no balanço vertical (chuva, interceptação, evapotranspiração, infiltração,

percolação e umidade do solo) depende de fatores como, tipo, uso do solo e geologia, enquanto os processos de escoamento (horizontais) dependem da drenagem que pode sofrer alterações em pequenas unidades espaciais.

Começou-se a usar modelos distribuídos mais modernos onde temos uma distinção dos processos, o escoamento é representado por módulos denominados de mini-bacias, determinados em função da declividade, solo, e seu uso, denominado de Unidades de Resposta Hidrológica (URH). Na presente tese os processos realizados seguiram a seguinte rotina.

a- Inserção do Mapa e banco de dados de Uso e ocupação do solo, e os atributos de informações pertinentes ao banco de dados dos usos mapeados na área do projeto, o aplicativo analisa a atribuição de classes e solicita que seja indexado o seu respectivo uso do solo, sendo Agricultura 1 caracterizada por um estado vegetativo de desenvolvimento médio a alto, Agricultura 2 apresenta um desenvolvimento vegetativo baixo, Urbanização e Vegetação arbustiva, este reconhece o atributo no banco de dados e automaticamente calcula o tamanho da área de cada classe. em percentagem, após este gera um novo mapa de acordo com a figura 21.

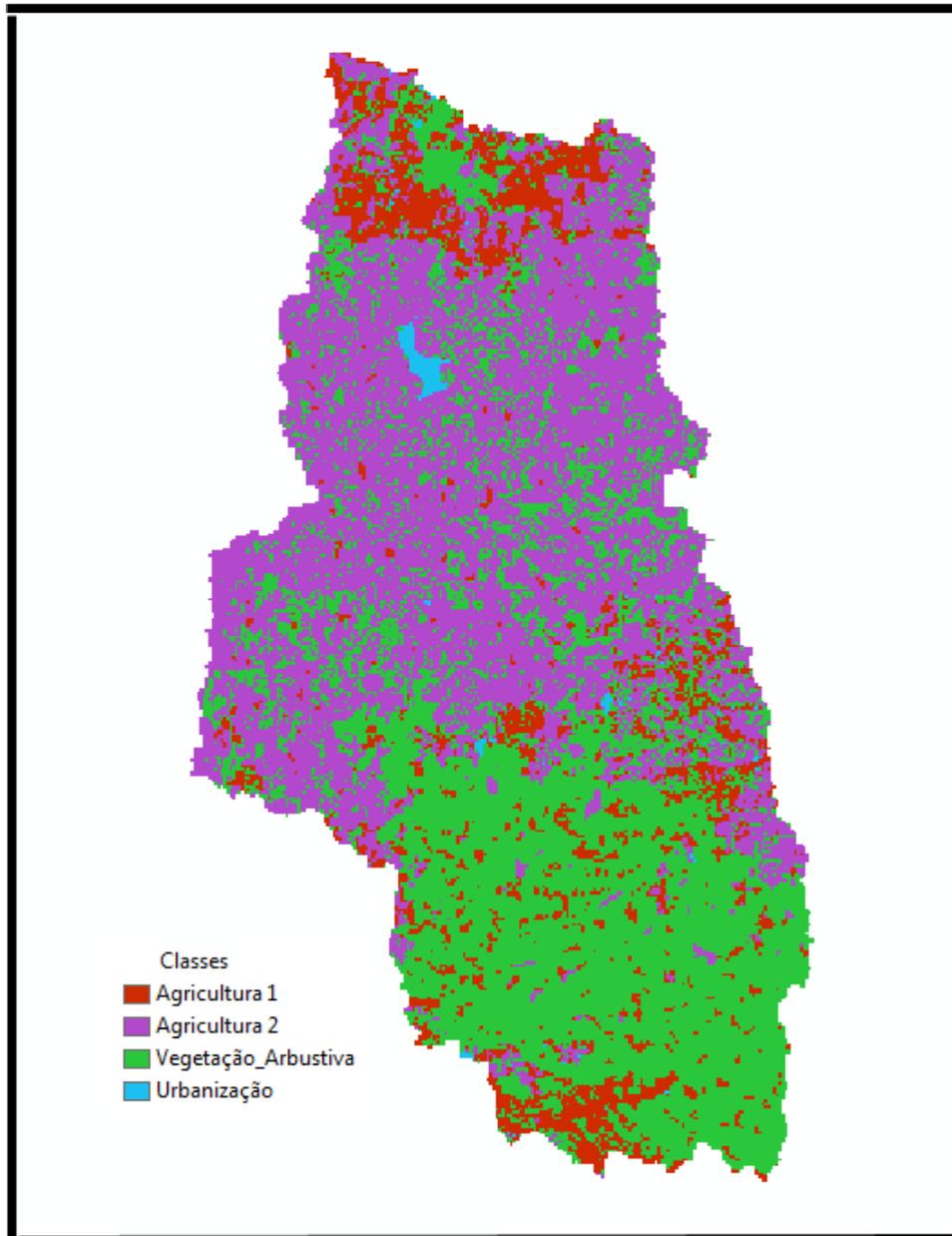


Figura 21 - Bacia reclassificada de uso e ocupação do solo pelo Simulador SWAT

b- Inserção do Mapa de Solos, elaborado a partir do levantamento da Embrapa atualizado, realiza-se a atribuição dos respectivos tipos de solos e suas características armazenadas no banco de dados indexado sendo Chernossolo, Latossolo, Argissolo, Neossolo e Luvisolo, após está o aplicativo SWAT gera um novo mapa reclassificado, de acordo com a figura 22.

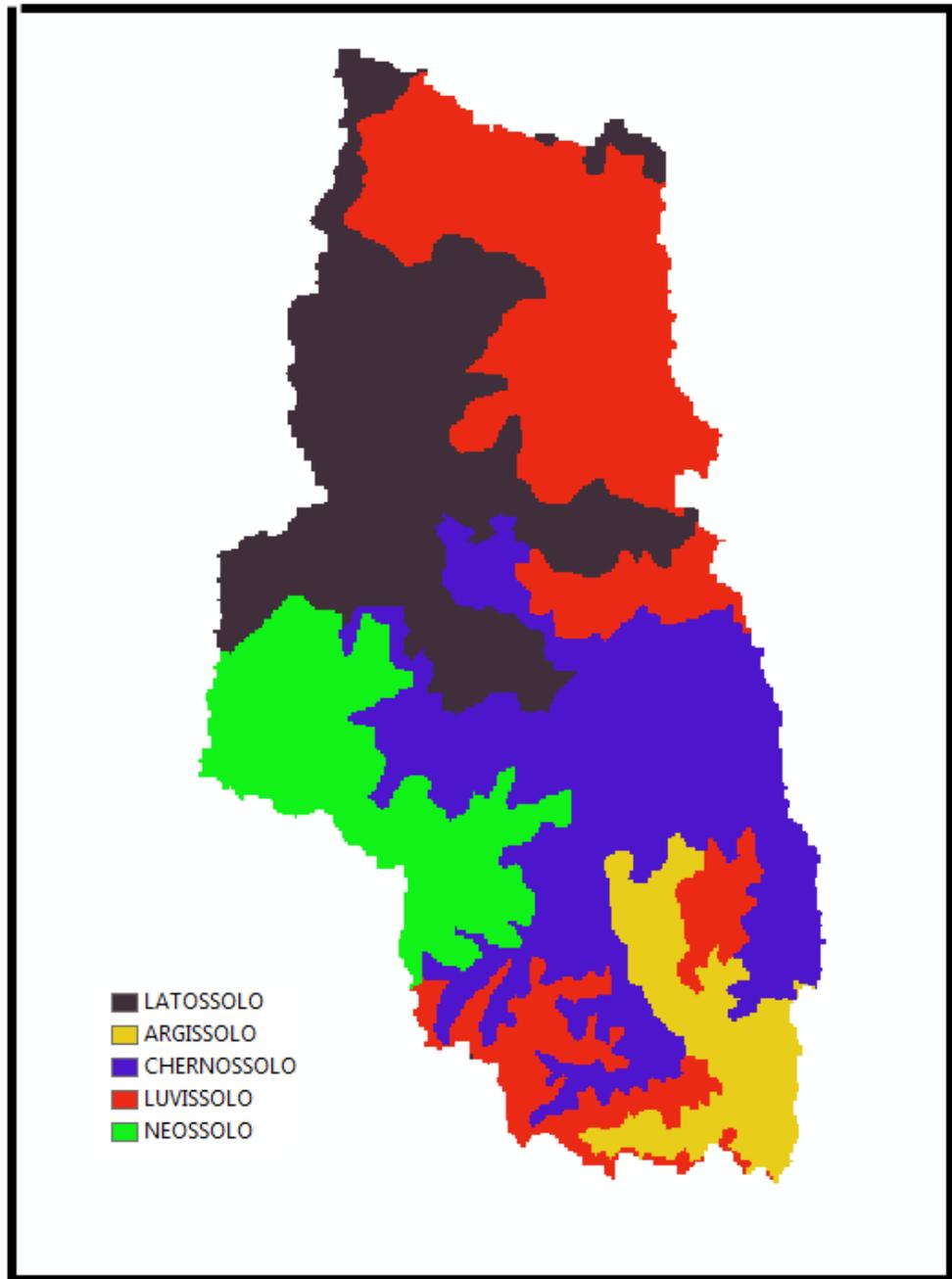


Figura 22 - Bacia com solos reclassificado pelo SWAT

c- Inserção Mapa de Classes de Declividade, trabalhamos com múltiplas setas a qual disponibiliza até quatro classes de declividades, devemos primeiramente observar a análise estatística realizada sobre o terreno fornecida pelo aplicativo e trabalhar com os valores de declividades máximas e mínimas por este determinado para definição do intervalo de classes, a declividade mínima foi de 0 % e a máxima de 62 %, com uma média de 11 % obtendo-se os seguintes intervalos de classe conforme tabela 17.

Tabela 17 - Graus de declividade.

<i>Classes</i>	% Declividade
1	0 - 12
2	12 - 24
3	24 - 36
4	36 - 48

Após a re-amostragem da imagem, o aplicativo gerou a área do projeto com seus respectivos intervalos de classe delimitados, figura 23.

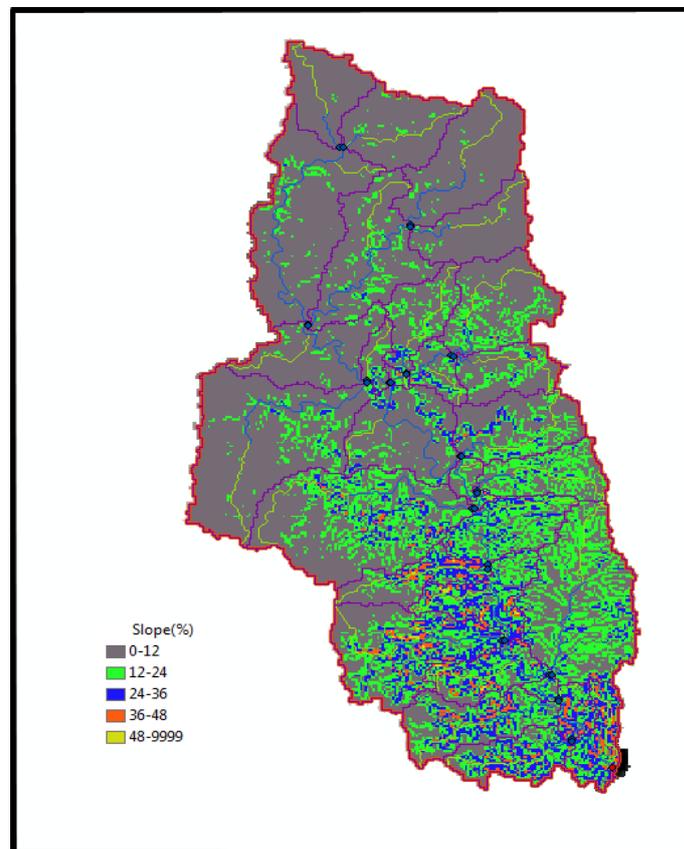


Figura 23 - Declividades distribuída em classe pelo simulador.

Estabelece-se as Unidades de Resposta Hidrológica que são regiões que apresentem a mesma composição em suas áreas em relação aos três itens analisados, solos, uso e ocupação e declividade, quando estes são similares são identificados como pertencentes à mesma classe de Unidades de Resposta hidrológica, a bacia é dividida em sub-bacias parametrizada pelo SWAT.

Uma ou mais combinações de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos e solos.

O escoamento é calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia, isso pode aumentar a precisão das predições e fornecer uma melhor descrição física do balanço de água na bacia. (ARNOLD et al. 1998). O modelo fornece duas opções de distribuição de HRU's:

-HRU dominante: em cada sub-bacia, a combinação uso do solo e o tipo de solo que apresentarem maior extensão, são considerados para toda a área da sub-bacia, e os demais tipos serão descartados.

- HRU Múltiplas: criados várias combinações de usos e tipos de solos para cada sub-bacia gerada, de acordo com o nível de sensibilidade escolhida pelo usuário do programa. A elaboração das HRU's envolve dois passos: primeiro os usos do solo das sub-bacias são identificados e os diferentes tipos de solos são selecionados. Dessa forma, cada HRU estabelecida apresentara uma combinação única entre um tipo de uso do solo com um tipo de solo, optamos na presente tese pela HRU múltiplas.

É gerado um relatório com as diversas HRU's com informações de declividades, tipo de solos e uso, com suas respectivas áreas, este processo foi realizado para as diferentes resoluções analisadas.

Após os cálculos realizados ocorre a demarcação das HRUs, obteve-se um total de 31, conforme demonstrado na figura 24.

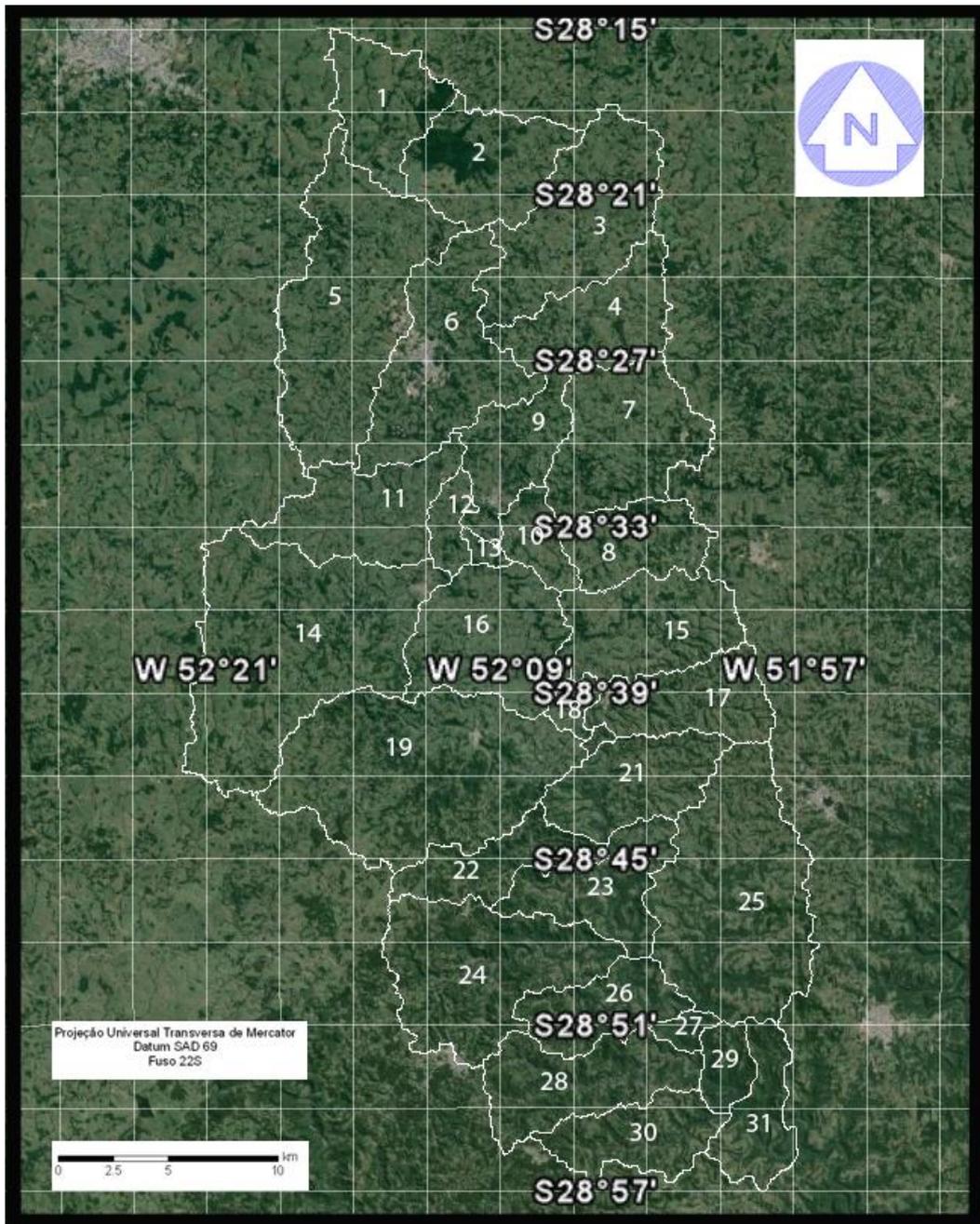


Figura 24 - Distribuição das HRUs, projetadas sobre imagem satélite.

3.26.3 Inserção dos dados Tabulados

Como demonstrado nos capítulos anteriores no processo de simulação do aplicativo SWAT trabalhamos com dois tipos de dados tabelados que foram armazenados no banco de dados, de solos e climáticos, o segundo dividido em dados climáticos médios que serão

utilizados no simulador climático WXGEN para realizar o preenchimento de falhas, e dados diários, ambos já determinados nas etapas anteriores.

O aplicativo solicita que se realize o input com as estações, disponibilizando a opção de carregarmos um banco de dados desenvolvido para o projeto com características climáticas da área do projeto, este vai servir como gerador climático para preenchimento de falhas, após carrega-se os dados diários coletados nas estações já pré-determinadas, sendo, Temperaturas, precipitação, velocidade dos ventos, umidade e radiação solar, as estações selecionadas para fornecer os dados diários foram, Pch Guaporé, Guaporé-Montante, Arvorezinha, Veranópolis, Ilópolis, Campo do Meio, Barragem Capingui, Marau, e Camargo.

O critério para seleção das estações foi o de proximidade e disponibilidade de dados, sendo que foi estimado um período de 20 anos de dados climáticos para abastecer a simulação, observando-se que nas situações onde ocorreu falha de coletas o simulador climático realiza este preenchimento, devendo estas datas ficar preenchido com o número – 99, indicador para o sistema que aquele dado deve ser preenchido pelo simulador.

Depois de inserido informações no banco de dados devemos rodar o sistema para este armazenar os novos valores no banco climático que irá usar estas informações na simulação.

3.26.4 Execução da Simulação

Com todas as informações inseridas executamos o modelo, onde temos a opção de configurar o intervalo de tempo para este realizar a simulação, no presente caso trabalhamos com períodos distintos em função dos dois objetivos propostos:

Objetivo 1 - Executou-se a simulação sem calibração dos anos de 1989 a 2012 para vazão e 2000 a 2012 para sedimento, onde os primeiros dois anos servem para aquecimento do modelo.

Objetivo 2 - Vazão- Executou-se a simulação de 1989 a 2012, com a calibração de 1989 a 2001 e validação de 2002 a 2013.

Sedimento - Executou-se a simulação de 1989 a 2012. Podemos configurar também a opção de simulação diária, mensal ou anual, optamos por mensal em função do tamanho da bacia e da quantidade de dados a ser simulada, esta mesma rotina será executada para as imagens com resolução espacial de 10, 30, 50, 100 e 200 metros.

Após executarmos a simulação solicitamos a geração do relatório de simulação para após executarmos a análise de sensibilidade.

Deve-se observar o período que o modelo leva para se aquecer, deixando-se certo tempo para que este estabilize o processamento dos dados, existe certa incerteza nas condições de processamento inicial tendo em vista que o simulador não tem conhecimento sobre a variabilidade dos dados, optou-se por trabalhar com três anos para este processo, Wagener et al. (2004), coloca que essas incertezas nas condições iniciais podem ser minimizadas utilizando um período de aquecimento do modelo que permite reduzir os eventuais erros existentes nas condições iniciais

3.26.5 Análise de Sensibilidade do Modelo SWAT

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo de simulação sensível a mais de 100 variáveis relacionadas à vegetação, manejo, tipo dos solos, clima, ou seja, existe uma vasta gama de parâmetros que podem influenciar. É importante que se identifiquem quais são estes e sua importância nos resultados gerados, bem como que mudanças cada alteração provocam no modelo (JHA, 2009). Para isto temos a necessidade de uma revisão bibliográfica de outros trabalhos que indiquem como estes parâmetros influenciam, é possível conseguir resultados similares com distintas combinações de entrada.

A análise de sensibilidade utilizada pelo simulador determina quais são os parâmetros mais relevantes na simulação, estes são escalonados em nível hierárquico de importância, sendo indicativo de quais devem ser testados primeiro, ou seja, realizam-se mudanças nos valores dos parâmetros de entrada e verifica-se a resposta da simulação.

Conforme, Van Griesven (2009), a ferramenta de análise de sensibilidade do SWAT, permite identificar quais parâmetros são mais sensíveis e afetam a variável que se deseja calibrar no modelo, porém não permite que o usuário defina quais as variáveis a serem analisadas, as quais são definidas (no total de 27) pelo default do modelo.

Dentre os resultados da análise por essa ferramenta, é gerado um arquivo contendo a posição dos parâmetros analisados, com valores variando entre uma maior sensibilidade e 28 menor, ou nenhuma sensibilidade.

A análise de sensibilidade pode ser realizado de duas maneiras, automática e manual, descritas a seguir:

1- Manual Kannan et al. (2007), coloca que métodos que realizam uma mudança gradativa nos dados de entrada (input), observando as alterações que ocorrem com os dados de saída (output), não podem ser aplicados a alguns parâmetros, como CN, pois este sofre grandes alterações com pequenas mudanças de valor.

De forma manual, uma maneira de realizar a análise de sensibilidade do modelo variando cada parâmetro de entrada, individualmente, enquanto os outros são mantidos constantes foi apresentado por McCuen e Snyder (1986). Para quantificar o impacto de um intervalo de valores de um dado parâmetro de entrada sobre os resultados obtidos com o modelo, foi utilizado o Índice de Sensibilidade Relativo (IS), conforme equação abaixo.

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (39)$$

Onde:

IS = índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;

R1 = resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada;

R2 = resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada;

R12 = média dos resultados obtidos com o menor e o maior valor de entrada;

I1 = menor valor de entrada;

I2 = maior valor de entrada; e.

I12 = média dos valores de entrada.

A partir destes resultados, definimos os parâmetros que devem ter seus valores alterados no modelo com valores mais próximos a um são os mais sensíveis.

2 - Automática, podendo ser realizada por dois processos.

a- Latin Hypercube simulations (LH) e (LH-OAT) assegura que toda gama de parâmetros é analisada, enquanto cada variação na saída é atribuída a uma variação específica na entrada. *Latin Hypercube* é baseado na simulação de Monte-Carlo, eliminando inúmeras simulações através de uma amostragem estratificada que permite uma estimação eficiente das

estatísticas de saída. A amplitude de cada parâmetro é dividida em faixas, após o modelo faz uma combinação randômica dos parâmetros, cada faixa é testada uma única vez.

A análise automática tem como vantagens a agilidade e desvantagem a necessidade de um conhecimento básico dos parâmetros, o operador inexperiente pode acabar deixando de observar algumas peculiaridades.

b- One factor at a time sampling (OAT), através da rotina Sensitivity o simulador no momento que executa a simulação gera um relatório com os parâmetros mais sensíveis, O método OAT promove a alteração de apenas um parâmetro a cada simulação, permitindo que as mudanças sejam atribuídas unicamente ao parâmetro alterado.

A análise de sensibilidade foi realizada, de forma manual. A definição das fontes de incerteza será baseada na análise dos parâmetros e variáveis de entrada do modelo que indicaram quais foram os mais sensíveis, ou seja, aqueles que quando modificados, influenciaram de maneira significativa os resultados.

Geram-se os códigos do parâmetro no SWAT, com o nome do parâmetro e o nível de sensibilidade variando entre um e 28 para a área de estudo.

Será realizado o processo tanto para vazão como produção de sedimentos, observando-se que neste processo não será executado para todas as imagens com diferentes resoluções, mas sim somente para aquela que apresentou melhores resultados, entende-se que seria a com resolução espacial de 200 metros baseado nos dados da etapa anterior.

Conforme trabalhos desenvolvidos por diversos autores, no Brasil os parâmetros que se apresentaram mais sensíveis no processo de produção de sedimentos são o número da curva (CN), a capacidade de água disponível (SOL_AWC), a declividade média (SLOPE), a condutividade hidráulica do solo (SOL_K), a profundidade das camadas do solo (SOL_Z), o fator alfa de recessão do fluxo de base (ALPHA_BF), o fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), o armazenamento de água máximo na copa das árvores (CANMX) e, o tempo de retardo do escoamento superficial (SURLAG) e o fator de práticas de manejo da USLE (USLE_P) no caso da produção de sedimentos.

As etapas executadas para a análise da sensibilidade dos parâmetros são:

- a- definição dos parâmetros mais sensíveis através de pesquisa bibliográfica e do próprio manuseio do modelo, conforme dados anteriores já identificados.
- b- simulação inicial, alterando-se apenas parâmetros já pré identificados para a realidade da bacia Guaporé.
- c- comparação dos dados medidos e simulados.
- d- verificação dos ajustes necessários

- d- identificação dos parâmetros que melhor se enquadrariam aos ajustes necessários.
- e- teste dos parâmetros, utilizando-se novos valores.

3.26.6 Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo SWAT pode ser executada sobre quatro aspectos: balanço da água e escoamento, sedimento, nutrientes e pesticidas. Esta é uma etapa importante, pois os parâmetros do modelo são ajustados.

Após a primeira simulação das vazões mensais realizada, sem calibração prévia, chegamos a resultados de saída que não condizem com a realidade. O modelo em algumas situações subestimou ou superestimou os dados, para tal fez-se necessário à calibração dos dados. Durante processo de simulação de vazões, o SWAT permite a calibração de 27 parâmetros, estabelecemos parâmetros adequados de entrada dos modelos e as condições internas do sistema, verificando-se a adequação das respostas.

Nicklow (2005), a calibração pode ser feita de maneira manual ou automática, sendo a primeira a mais usada em modelos complexos alterando um parâmetro por vez até que um ajuste seja aceitável e os valores simulados se aproximem dos observados, é dispendioso em termos de tempo, além de ser muito subjetivo, sendo o sucesso da calibração muito dependente da experiência do pesquisador e do seu conhecimento da bacia em estudo. Já a calibração automática envolve o uso de um algoritmo que determina o melhor ajuste dos parâmetros, sendo, dessa forma, mais rápida, e não havendo conhecimento suficiente do pesquisador em relação à área de estudo, por ser menos subjetiva, espera-se que os resultados obtidos sejam melhores do que os da calibração manual.

A calibração foi feita manualmente, sendo necessário realizar vinte e seis vezes o mesmo processo, substituindo-se gradativamente os parâmetros e analisando as respostas na nova simulação.

O ajuste dos parâmetros deve seguir orientações contidas no manual do modelo SWAT. Os parâmetros testados e as faixas de variação dos valores estão apresentados no manual, bem como os valores ótimos dos parâmetros a serem adotados.

Será realizada a avaliação de ajuste em função da análise estatística, fez-se a comparação entre o evento simulado e o evento observado, utilizando-se COE.

Para avaliar o desempenho de modelos utilizam-se métodos estatísticos, o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe - COE (MACHADO, 2002), apresentado pela equação abaixo. Este coeficiente pode variar de - infinito a 1, sendo que 1 significa um ajuste perfeito.

Gassman et al. (2007), ao analisarem resultados de vários autores, consideraram adequados os valores de COE superiores a 0,5, Este coeficiente de eficiência foi utilizado por Tripathi et al. (2003), Srinivasan e Arnold (1994), Machado (2002), Muleta e Nicklow (2005), Neves (2005), Trung (2005), os quais obtiveram resultados bastante satisfatórios, No período de calibração, as variáveis citadas serão alteradas até o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe atingir o valor para um ajuste aceitável.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \bar{E})^2} \quad (40)$$

Em = evento observado para o período analisado;

Es = evento simulado para o mesmo período;

E = média do evento observado,

n = número de eventos.

Para conclusão do segundo objetivo proposto deve-se separar uma série temporal de dados medidos em dois períodos, para calibração selecionou-se período entre 1989 e 2001 e para validação do modelo 2002 a 2013.

Após a calibração os resultados indicam se o modelo é capaz de reproduzir os verdadeiros resultados de campo, é um processo extremamente demorado e que requer conhecimento amplo do problema, a não execução dessa etapa pode comprometer o resultado obtido pela simulação, repercutindo na obtenção de tendências equivocadas (MACHADO, 2002).

A calibração não garante a fidedignidade das predições do modelo. Machado (2002) e Amorim (2004) ressaltam que uma série histórica de dados é particularmente importante em função da variabilidade natural de ano para ano nos fatores que afetam o processo erosivo e o transporte de água e sedimentos e, dessa maneira, a imprecisão do modelo pode ser compensada com um maior período de tempo.

Entendesse que em função da complexidade das relações estabelecidas entre os dados de campo e a simulação, a calibração quase sempre é necessária, e que erros na simulação são maiores sem calibração Grunwald e Frede, 1999, citados por Machado, 2002.

As escolhas das variáveis na calibração seguiram as orientações contidas no manual do modelo SWAT, e foram: o ALPHA_BF, o GWQMN, o GW_REVAP, o REVAPMN, o SLSOIL, o LAT_TIME, e o CN.

Onde:

GWQMN: profundidade de água subterrânea requerida para que o retorno do fluxo ocorra (mm H₂O);

ALPHA_BF: fator do fluxo de base, ou constante de recessão. Define-se como a taxa na qual a água subterrânea retorna ao rio (dias);

REVAPMN: profundidade de água no aquífero para que ocorra percolação (mm H₂O);

GW_REVAP: variável que controla a quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes.

CN: Curva de número (os valores de CN que é diferente para cada classe de uso e ocupação do solo, foram alterados apenas alterando o grupo de saturação hidrológica no banco de dados de solo inseridos no modelo, e desta forma alterando o CN automaticamente).

SLSOIL: Comprimento da rampa lateral para o fluxo de sub-superfície (m);

LAT_TIME: Tempo de retorno do fluxo lateral (dias).

4. RESULTADOS

Os resultados da presente tese foram analisados separadamente em função dos objetivos propostos ficando denominados de:

Resultados objetivo 1- onde foi analisada a resposta de simulação do Modelo SWAT sem calibração na produção de sedimentos e vazão líquida alterando a resoluções espacial do pixel de 10, 30, 50, 100 e 200 metros das imagens de uso e ocupação, solos e declividade comparando resultados obtidos na simulação, com dados medidos em um posto hidrossedimentométrico.

Resultados Objetivo 2- Analisar as resposta da simulação na estimativa de vazão líquida e produção de sedimentos do modelo comparados com dados medidos em postos hidrossedimentométricos

4.1 Resultados do Objetivo 1

Como já havia sido proposto um dos objetivos da presente tese, é o de analisar como as imagens com distintas resoluções espaciais se comportaram no processo de simulação no SWAT, sem que ocorra calibração do modelo, relacionando os dados de vazão e sedimentos transportados que alcançam o canal, iniciando o que denominamos de fase do canal, ou seja, iremos analisar a vazão líquida denominada pelo simulador de Flow-out e a produção de sedimentos Sed-Out.

Foram comparados dados coletados a campo pela UFSM e pela ANA da estação hidrosedimentológica determinada Linha Colombo, com dados simulados pelo modelo SWAT, alterando as resoluções espaciais das imagens de uso e ocupação do solo, declividade e solos, com valores de resolução espacial de 10, 30, 50, 100, e 200 metros interpolados.

Como critério estabeleceu-se que o melhor produto, ou seja, a melhor resolução de imagem será aquele que, a simulação gerar dados de vazão em m^3/s e transporte de sedimentos em $(t\ km^{-2}\ ano^{-1})$ mais próximas dos valores medidos a campo, analisados através de três processos sendo estes, análise de percentagem, análise estatística, análise de regressão, o produto que gerar melhores resultados nos três métodos de análise será utilizado nas etapas seguintes de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo.

4.1.1 Análise com distintas Resoluções sem calibração, parâmetro de percentagem

4.1.1.1 Produção de sedimentos (Sed_Out)

A primeira análise foi feita sobre os dados de produção de sedimentos, mensalmente dos anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, e 2012, onde o simulador forneceu o valor calculado de sedimentos ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$) no exultório denominado de Sed-Out localizado na sub-bacia 31, nas distintas resoluções de 10, 30, 50, 100 e 200, estas comparadas com dados fornecida pela UFSM. (Tabela 18)

Foi inserida juntamente na tabela uma coluna com a melhor resolução levando-se em consideração que a seleção desta é em função do valor simulado estar mais próximo do valor medido, representando-se como situação ideal a seguinte equação. Mr (Melhor Resolução) = Vs (Valor Simulado) - Vm (Valor Medido) = 0

Tabela 18 - Produção de sedimentos com as distintas resoluções relacionadas com dados coletados a campo ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$).

ANO	10	30	50	100	200	UFSM	Melhor Resolução
2000	44768.84	42499.11	39308.66	26537.15	677.44	789.64	200
2000	159657.1	150233.7	141546.5	92638.51	534.95	194.62	200
2000	288.23	262.34	255.86	186.38	3856.45	1127.95	10
2000	14614.07	13933.25	13181.43	8431.58	35361.18	697.46	100
2000	593.23	5850.72	596.57	459.54	23021.65	387.76	100
2000	1003.12	806.38	1277.75	885.98	29340.87	14123.2	50
2000	12824.76	14970.31	14482.62	11084.98	23899.81	47067.19	200
2000	2067.11	2562.44	2796.21	2187.43	20810.79	1821.67	10
2000	56.62	72.98	92.88	89.63	20521.51	43381.14	200
2000	584.07	715.71	809.84	559.49	4171.83	152662.7	200
2000	943.92	848.46	779.21	514.61	8067.26	4158.58	10
2000	39918.64	37283.48	35555.11	23783.57	1197.83	634.2	200
2002	50635.12	48791.35	46484.16	32088.71	469.61	1375.075	200
2002	16.86	33.82	40.89	42.71	3597.08	331.945	100
2002	196644.2	187161.4	178101.1	118031	320.57	357.7499	200
2002	535.01	508.06	497.83	359.11	41126.21	4653.875	10
2002	4896.54	5098.02	5508.78	4009.66	13457.95	48411.6	200
2002	415.11	375.64	395.96	288.61	3878.98	117285.4	200
2002	230.23	200.71	205.82	151.59	45462.95	44457.19	200
2002	31.73	27.18	28.43	21.17	2227.02	41043.94	200

2002	275.52	218.71	197.33	127.01	38820.64	44570.29	200
2002	2222.65	2329.69	2264.67	1672.39	2556.01	47633.56	200
2002	2932.99	2790.18	2605.97	1727.38	6602.46	25821.61	200
2002	25382.17	23733.86	22369.98	14830.61	971.79	42918.78	10
2004	10824.37	9919.52	10034.05	7133.39	282.42	1702.814	200
2004	133173.8	127065.1	118440.5	77930	2267.95	3147.69	200
2004	87061.52	82672.67	77251.53	50828.96	345.51	48.92729	200
2004	1865.51	1757.64	1680.14	1118.61	2146.86	79.05414	50
2004	694.95	675.47	685.95	517.99	9013.78	5711.064	200
2004	13337.95	14904.68	15323.2	1105.91	45778.09	20394.46	50
2004	43019.49	40849.73	38780.43	24091.03	27467.19	6719.655	100
2004	1008.39	107431.6	1205.04	1016.09	6053.12	366.1245	200
2004	4489.58	4722.85	4622.84	3266.14	10294.76	8309.354	200
2004	3772.96	3635.13	3503.53	2394.69	3454.79	7797.604	10
2004	1070.7	1059.05	1050.72	772.17	965.45	9959.142	10
2004	7168.63	6860.09	6023.17	4180.04	545.59	190.4762	200
2006	34448.38	37869.42	36282.03	26875.98	707.95	319.9244	200
2006	81152.36	77066.71	72992.31	48224.19	570.17	87.25369	200
2006	26716.88	253866.9	23676.98	15186.04	606.27	303.8964	200
2006	23906.51	22672.86	20937.95	13400.51	29655.51	84.72204	100
2006	4499.92	487.63	519.05	420.76	20978.52	68.79612	100
2006	10416.59	10723.43	10859.17	7988.51	13717.73	6434.562	100
2006	5920.49	7154.37	7719.09	5661.44	22035.88	39192.49	200
2006	882.76	1036.52	1129.45	900.91	4271.68	5190.015	200
2006	2457.87	2337.55	2222.64	1470.93	4953.57	1247.849	100
2006	166.01	199.37	231.51	203.07	834.68	249.4743	50
2006	9825.74	9924.62	9917.44	6795.78	7668.74	5493.156	100
2006	26979.39	25717.25	25229.12	16647.53	663.61	656.8573	200
2008	34187.93	32366.26	30732.96	20240.32	321.61	577.8315	200
2008	9066.07	8603.71	8107.46	5501.63	174.09	76.71793	200
2008	39862.48	37101.54	35137.25	23216.63	1197.79	76.57958	200
2008	14173.71	13328.13	12506.77	8049.38	53035.81	85.98416	100
2008	1423.28	1438.01	1527.58	1078.78	3338.85	863.6612	100
2008	5452.68	5375.15	5960.76	4202.99	6698.86	12869.94	200
2008	670.69	572.59	808.71	564.68	25050.79	3339.536	50
2008	785.65	812.02	1013.32	802.94	1915.39	14298.08	200
2008	820.69	776.77	1047.82	758.85	33480.59	2554.886	50
2008	334.79	326.11	321.62	246.28	8470.62	139051.1	200
2008	551.19	539.56	527.16	397.28	828.55	73453.42	200
2008	27876.61	25771.92	24765.83	16912	430.06	222.6416	200
2010	7867.42	7312.39	6916.87	4985.71	216.31	127108.6	30
2010	70243.07	65092.45	62092.57	41741.89	259.02	20064.06	100
2010	40227.65	35654.44	34824.61	23067.29	790.37	443.1898	200
2010	3031.71	2831.95	2690.41	1747.54	26536.99	2213.808	50
2010	1077.47	1017.13	1008.52	700.99	4568.68	9545.715	200
2010	1165.41	1243.16	1321.18	1046.01	49621	18927.25	200
2010	430.81	399.81	404.81	307.04	27801.21	39603.33	200
2010	308.67	335.28	355.93	291.23	18683.33	2023.002	50
2010	812.42	858.93	859.86	632.52	19225.77	22266.64	200
2010	401.25	391.73	387.93	290.89	2607.57	1070.372	10
2010	2830.43	2650.89	2483.34	1607.83	38262.42	1800.195	100
2010	49346.61	47151.79	44291.35	29536.59	2564.89	3551.645	100
2012	715.28	760.17	796.32	607.31	272.81	42.82909	200
2012	886.76	872.06	878.83	662.11	214.36	53.04432	200

2012	179665.2	168701.4	158564.3	104316.6	186.47	309.1071	200
2012	279.1	271.91	273.39	208.44	4876.13	10.83901	100
2012	3402.75	4226.47	4395.34	3291.23	88629.31	8.699482	100
2012	1021.49	1116.94	1273.74	974.78	13411	204.5204	100
2012	3536.51	3608.51	3685.41	2515.77	7351.27	7849.875	200
2012	3732.02	3728.51	3633.41	2364.18	1016.71	948.3771	200
2012	5792.74	5439.53	5192.41	3146.03	685.41	49447.01	10
2012	2514.19	2441.43	2484.28	1608.62	1111.26	11632.94	10
2012	1185.27	1088.93	1027.83	692.87	3617.65	189.6602	100
2012	22830.97	21233.39	20027.03	13732.51	888.45	3989.541	200

Através de uma análise de percentagem simples, chegou-se aos seguintes resultados para análise do transporte de sedimentos conforme tabela 19.

Tabela 19 - Desempenho das resoluções na simulação de sedimento sem calibração

<i>PERIODO</i>	<i>Resolução</i>	<i>Ocorrência</i>	Desempenho
			%
84 MESÊS	10	10	11,90
84 MESÊS	30	1	1,19
84 MESÊS	50	8	9,53
84 MESÊS	100	18	21,42
84 MESÊS	200	47	55,96

Observa-se que a resolução de 200 metros apresentou o melhor desempenho, onde em 55,96% das simulações o valor de produção de sedimentos ficou mais próximo do medido a campo, o segundo melhor resultado foi com a resolução espacial de 100 metros, verifica-se que a resolução espacial do pixel para a produção de sedimentos em geral apresentou um melhor desempenho em resoluções altas.

4.1.1.2 Vazão Líquida (Flow_Out)

A segunda análise será sobre os dados de vazão líquida em m³/s dos anos de 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1999, 2002, 2006, 2008, 2010, 2012, onde o simulador forneceu o valor calculado denominado de flow_out, com distintas resoluções de 10, 30, 50, 100 e 200, estas comparadas com dados fornecidos pela UFSM, conforme a tabela 20.

Foi inserida na tabela uma coluna com a melhor resolução já determinada seguindo o critério de valor medido mais próximo do simulado, existem algumas datas que não apresentaram informações sendo estas consideradas com falhas e não computadas nas análises.

Tabela 20 - Resultados da Simulação de Vazão Líquida com distintas Resoluções.

ANO/MÊS	1989-10	1989-30	1989-50	1989-100	1989-200	1989-ANA	Melhor Resolução
1	FALHA	FALHA	2070,99	FALHA	1363,5	858,89	Falha
2	2007,5	2015,23	1991,17	1621,74	1459,7	553,65	200
3	2500,3	2461,95	2430,9	1935,96	1528,48	727,65	200
4	2320,79	2272,09	2239,35	1785,37	2188,36	634,24	100
5	1947,71	1919,64	1910,06	1543,87	2664,83	561,3	100
6	2364,05	2325,42	2287,45	1821,49	3757,43	207,78	100
7	3626,6	3585,99	3545,84	2744,51	3704,6	1409,64	100
8	2794,87	2790,63	2791,99	2246,17	3431,87	1880,5	100
9	1450,6	1603,19	1699,88	1503,88	2809,93	8381,38	200
10	1380,35	1366,08	1413,08	1170,15	2903,42	2376,2	100
11	2275,04	2179,25	2098,77	1614,12	3598,75	139,6	100
12	2104,28	2154,24	2173,79	1847,23	3024,36	86,15	100
	1990-10	1990-30	1990-50	1990-100	1990-200	1990-ANA	
1	2462,74	2494,02	2515,98	2093,96	2857,01	2780,95	200
2	1805,19	1854,22	1872,82	1575,7	2816,34	FALHA	FALHA
3	1984,12	1961,96	1933,56	1541,45	2558,04	1421,52	100
4	2116,57	2058,1	2017,02	1595,08	2449,62	2408,95	200
5	1750,34	1707,19	1695,45	1360,21	4017,58	3638,96	200
6	2085,31	1944,91	1886,56	1433,85	3980,89	3766,04	200
7	2496,72	2408,28	2359,88	1837,3	4233,21	2010,28	100
8	1986,27	1970,99	1964,18	1608,57	3956,02	FALHA	FALHA
9	2123,92	2158,54	2167,75	1799,98	3610,82	2219,8	50
10	2376,76	2360,48	2337,35	1885,18	3552,67	1367,14	100
11	3057,4	3030,54	3024,41	2367,93	2992,91	FALHA	FALHA
12	2764,17	2828,57	2857,38	2371,66	2687,37	FALHA	FALHA
	1993-10	1993-30	1993-50	1993-100	1993-200	1993-ANA	

1	1463,17	1605,58	1688,42	1450,75	1642,68	681,43	100
2	1974,2	2043,7	2070,99	1742,1	1443,65	335,64	200
3	4017,44	3980,62	3952,85	3063,57	1410,78	502,69	200
4	3111,7	3069,88	2844,78	2366,99	2009,57	489,68	200
5	2519,83	2564,55	2583,91	2120,91	2257,7	1450,15	100
6	3045,65	3009,47	2976,38	2335,68	3080,02	2345,73	100
7	1478,33	1664,94	1758,47	1552,62	3209,14	5560,27	200
8	2016,4	1963,44	1966,22	1587,8	3211,19	675,32	100
9	1998,41	1904,17	1868,78	1450,08	3188,33	1162,65	100
10	1347,92	1305,01	1321,08	1038,98	2402,75	1012,62	100
11	2737,82	2622,19	2539,14	1927,85	2492,96	1799,65	100
12	1362,82	1445,5	1517,71	1301,22	2702,35	3405,15	200
	1994-10	1994-30	1994-50	1994-100	1994-200	1994-ANA	
1	2090,91	2170,76	2189,68	1867,67	2024,02	439,3	100
2	1406,27	1469,43	1833,82	1808,62	2162,71	1818,99	100
3	2774,3	2754,78	2415,87	2191,17	2327,92	621,29	10
4	2164,6	2113,56	2081,57	1649,42	2885	3546,86	200
5	2241,38	2206,24	2189,53	1756,53	2809,95	3401,01	200
6	1705,64	1668,94	1661,34	1335,14	3066,65	2677,35	200
7	1551,22	1453,8	1408,3	1065,68	3669,36	FALHA	FALHA
8	1015,6	893,75	866,97	633,39	3374,74	1255,46	10
9	1199,83	1053,21	1009,02	734,77	3386,44	1422,86	10
10	1504,4	1403,46	1341,57	1039,34	2988,34	4859,85	200
11	1962,54	1954,2	1934,16	1769,43	3271,6	1808,02	100
12	2102,73	2125,87	2118,09	1755,92	3006,46	1242,57	100
	1995-10	1995-30	1995-50	1995-100	1995-200	1995-ANA	
1	1431,62	1489,34	1536,51	1296,34	2488,09	3152,19	200
2	2088,23	2111,91	2125,32	1751,87	2295,36	774,24	100
3	1946,74	1902,43	1862,42	1474,45	2630,36	756,98	100
4	1888,29	1836,22	1802,92	1439,54	2278,36	319,76	100
5	2181,73	2050,53	2018,01	1606,93	2712,95	396,94	100
6	2065,1	2030,21	2020,86	1637,74	3045,45	1031,93	100
7	1912,78	1823,72	1802	1432,52	3409,48	2243,93	10
8	1243,22	1212,83	1203,05	995,07	2846,11	1328,99	10
9	2190,62	2065,53	1983,83	1500,98	2716,51	1197,52	100
10	1207,18	1162,8	1161,52	915,43	3128,46	3099,76	200
11	2213,89	2142,11	2077,07	1637,29	3235,29	285,41	100
12	2486,89	2465,5	2439,69	1978,75	2488,58	205,97	100
	1999-10	1999-30	1999-50	1999-100	1999-200	1999-ANA	
1	1915,82	1988,51	2029,74	1712,78	2214,28	212,54	100
2	2757,45	2778,86	2780,38	2273,51	1656,45	282,92	200
3	2161,29	2121,24	2081,81	1635,33	1158,87	175,64	200
4	1894,27	1871,69	1860,62	1503,77	2604,67	1619,75	100
5	2644,45	2591,34	2553,63	2003,17	3338,81	521,94	100
6	2072,88	2087,09	2093,29	1727,33	3287,82	1507,07	100
7	1775,73	1731,62	1746,83	1411,62	3798,29	2928,7	200
8	2061,31	1939,7	1897,43	1469,19	3432,22	774,58	100
9	979,22	954,67	1010,74	827,87	3416,9	1238,52	50
10	2484,41	2387,87	2316,84	1777,24	3608,67	3416,61	200
11	2443,49	2381,96	2304,6	1845,52	3502,08	842,88	100
12	2235,92	2354,72	2384,35	2051,37	2942,01	1433,74	100

	2002-10	2002-30	2002-50	2002-100	2002-200	2002-ANA	
1	1978,32	2070,16	2085,57	1763,79	2170,76	630,77	100
2	292,67	527,8	604,37	520,98	2386,19	456,27	100
3	3830,43	3829,91	3821,46	3014,89	1871,92	491,94	200
4	2068,18	2032,93	2014,98	1612,74	3527,64	1113,76	100
5	2334,59	2278,82	2248,51	1786,22	3519,46	3027,69	200
6	1936,08	1885,22	1874,51	1499,04	3373,01	5044,48	200
7	1407,05	1346,82	1369,71	1092,43	4004,54	2738,48	200
8	334,09	312,83	351,46	265,36	3237,92	3463,83	200
9	1568,63	1443,23	1375,87	993,9	3518,49	3531,24	200
10	2380,66	2294,22	2205,42	1701,38	3199,77	4927,85	200
11	2093,15	2118,63	2114,69	1749,21	3138,26	3054,32	200
12	2247,67	2262,84	2259,68	1865,09	2699,65	3884,16	200
	2006-10	2006-30	2006-50	2006-100	2006-200	2006-ANA	
1	1436,36	1641,05	1705,52	1256,28	2688,98	469,8	100
2	2881,77	2905,7	2908,68	2348,34	2201,79	247,97	200
3	2648,38	2596,92	2553,6	2007,51	1879,75	341,95	200
4	3344,35	3284,72	3239,45	2505,14	3379,06	257,35	100
5	2020,22	2090,23	2134,39	1809,5	3341,15	239,83	100
6	3224,77	3165,33	3116,89	2419,94	3529,95	1195,99	100
7	2758,14	2759,29	2749,71	2207,02	3826,35	2222,1	100
8	2032,1	2103,53	2149,23	1823,47	3294,05	1367,5	100
9	2592,47	2576,07	2565,99	2065,39	3233,21	858,2	100
10	1196,03	1301,62	1395,62	1133,1	2695,82	438,08	100
11	2600,82	2711,48	2648,19	2050,11	2954,34	1445,57	100
12	3127,49	3121,33	3109,95	2467,37	2488,98	639,24	100
	2008-10	2008-30	2008-50	2008-100	2008-200	2008-ANA	
1	1839,16	1897,93	1903,26	1606,58	1811,64	547,97	100
2	954,88	1027,23	1061,2	924,53	1439,66	239,76	100
3	2534,26	2494,28	2454,54	1945,76	1628,79	230,17	200
4	3145,09	3073,52	3019,47	2321,79	3652,83	195,96	100
5	2609,3	2673,14	2668,64	2130,73	3113,07	623,4	100
6	2898,84	2892,36	2886,67	2313,52	3105,21	1959,44	100
7	2104,68	2078,31	2084,13	1702,78	3368,57	1192,54	100
8	1844,1	1845,37	1867,87	1931,45	2743,77	1946,81	100
9	1852,13	1790,34	1792,77	1441,85	3434,52	1140,38	100
10	1723,07	1723,94	1711,29	1387,95	3299,82	5271,7	200
11	2257,36	2234,14	2202,16	1761,99	2836,68	3051,01	200
12	2475,82	2512,07	2526,77	2080,81	2078,51	416,25	200
	2010-10	2010-30	2010-50	2010-100	2010-200	2010-ANA	
1	1412,23	1392,15	1382,27	1139,31	1550,04	4329,64	200
2	2364,88	2404,97	2414,74	2022,56	1682,05	1745,6	200
3	2485,29	2447,53	2426,5	1941,69	2049,16	585,17	100
4	2597,69	2537,09	2492,94	1943,44	3223,66	669,52	100
5	2563,52	2538,37	2523,77	2010,02	3528,29	1759,93	100
6	2404,23	2404,54	2399,08	1954,44	4014,3	1972,5	100
7	1963,02	1921,52	1926,07	1566,62	3976,49	3397,92	200
8	1459,83	1432,69	1454,27	1109,9	3517,33	1031,75	100
9	2059,83	2028,4	2005,2	1606,43	3424,71	1890,64	100
10	1746,32	1752,23	1737,93	1421,65	2990,38	879,22	100

11	2364,03	2332,19	2300,37	1828,32	3717,23	875,35	100
12	2272,05	2343,26	2374,74	1975,5	3219	1379,59	100
	2012-10	2012-30	2012-50	2012-100	2012-200	2012-ANA	
1	1130,89	1281,67	1370,84	1227,85	1688,06	FALHA	FALHA
2	708,28	858,66	923,22	827,46	1551,94	FALHA	FALHA
3	3397,62	3379,04	3353,68	2648,66	1424,23	275,42	200
4	1617,9	1606,94	1604,35	1305,97	2103,57	FALHA	FALHA
5	2613,96	2536,22	2480,03	1926,92	4162,47	92,13	100
6	1878,03	1903,59	1923,51	1597,56	3707,94	316,32	100
7	1858,66	1759,12	1782,25	1481,7	3500,6	1648,2	100
8	2389,89	2304,82	2264,84	1776,66	2610,18	686,24	100
9	2197,14	2174,69	2160,57	1729,26	2520,77	2385,69	200
10	1721,06	1770,1	1792,15	1471,27	2040,4	1931,92	200
11	2885,44	2829,25	2773,81	2140,07	2305,8	381,27	100
12	2339,09	2403,23	2431,4	2013,86	2062,43	1201,26	100

Tabela 21 - Desempenho das resoluções na simulação de vazão sem calibração

<i>PERIODO</i>	<i>Resolução</i>	<i>Ocorrência</i>	<i>Desempenho %</i>
122 MESÊS	10	5	4,10
122 MESÊS	30	0	0,0
122 MESÊS	50	2	1,64
122 MESÊS	100	75	61,47
122 MESÊS	200	40	32,78

Observa-se que a resolução de 100 metros apresentou o melhor desempenho, onde em 61,47% das simulações o valor de vazão ficou mais próximo do medido a campo, o segundo melhor resultado foi com a resolução espacial de 200 metros, verifica-se novamente que as resoluções espaciais maiores apresentaram valores mais próximos do medido.

4.1.2 Análise com distinta resolução sem calibração, parâmetro da análise estatística

4.1.2.1 Produção de Sedimentos

Serão realizados à avaliação dos dados médios anuais medidos em relação aos dados simulados médios anuais sem calibração, utilizando-se COE como descrito anteriormente, lembrando que o mesmo pode variar de - infinito a um, sendo que um significa um ajuste perfeito, Gassman et al. (2007), ao analisarem resultados de vários autores, consideraram adequados os valores de COE superiores a 0,5 conforme Machado (2002), Muleta e Nicklow (2005).

Tabela 22 - Determinação do coeficiente de eficiência (COE), dos dados de produção de sedimento, relacionado aos medidos

<i>Ano/Resolução</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	200
2000	COE -1,56	COE -1,40	COE - 1,26	COE - 0,67	COE 0,17
2002	COE - 2,00	COE - 1,83	COE - 1,66	COE - 0,82	COE - 0,03
2004	COE - 0,20	COE - 0,62	COE - 0,05	COE - 0,58	COE - 0,67
2006	COE - 0,50	COE - 2,41	COE - 0,57	COE - 0,78	COE - 0,92
2008	COE - 0,32	COE - 0,30	COE - 0,28	COE - 0,21	COE 0,20
2010	COE - 1,0	COE - 0,58	COE - 1,00	COE - 0,38	COE - 0,37
2012	COE - 0,59	COE - 0,42	COE - 0,26	COE - 0,39	COE - 0,53

Tabela 23 - Análise do aporte de sedimentos médios anuais através das ferramentas estatísticas COE.

<i>PERIODO</i>	<i>Resolução</i>	<i>Ocorrência</i>	<i>Desempenho %</i>
7 ANOS	10	3	14,28
7 ANOS	30	0	0,0
7 ANOS	50	2	28,57
7 ANOS	100	1	0,0
7 ANOS	200	8	57,14

Trabalhou-se com um intervalo de sete anos para analisarmos o aporte de sedimentos, as imagens com resolução de 200 metros de pixel apresentaram os melhores resultados comparando os dados médios anuais de aporte de sedimento simulados, relacionados aos medidos, com um desempenho percentual de 57%.

Observa-se que em nenhum momento os dados de produção de sedimentos sem calibração estiveram dentro do intervalo estabelecido pelas bibliografias como aceitáveis, ou seja, a simulação não pode ser considerada como representativa dos dados medidos a campo.

4.1.2.2 Vazão Líquida

Tabela 24 - Determinação do coeficiente de eficiência (COE) dos dados de vazão líquida simulada, relacionado aos medidos:

<i>Ano/Resolução</i>	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	200
1989	COE -2,07	COE -1,96	COE -1,88	COE -1,47	COE -2,13
1993	COE -0,88	COE -0,79	COE -0,70	COE -0,34	COE 0,01
1994	COE -0,05	COE -0,01	COE -0,03	COE -0,10	COE 0,26
1995	COE -0,02	COE -0,03	COE -0,06	COE 0,28	COE -0,53
1999	COE -0,03	COE -0,02	COE -0,05	COE -0,32	COE -0,58
2002	COE -0,92	COE -0,99	COE -1,01	COE -1,23	COE 0,11
2006	COE -0,62	COE -0,64	COE -0,62	COE -0,12	COE -1,27
2008	COE -0,54	COE -0,54	COE -0,53	COE 0,81	COE -0,42
2010	COE -0,11	COE -0,12	COE -0,11	COE -0,27	COE -0,88
2012	COE -0,19	COE -0,16	COE -0,13	COE -0,33	COE -0,72

Tabela 25 - Análise da vazão médios anuais através da ferramenta estatística COE.

PERIODO	Resolução	Ocorrência	Desempenho %
10 ANOS	10	2	20,00
10 ANOS	30	1	10,00
10 ANOS	50	1	10,00
10 ANOS	100	2	20,0

10 ANOS	200	4	40,0
---------	-----	---	------

Trabalhou-se com um intervalo de 10 anos, observa-se a imagem que apresentou melhores resultados foi a com resolução de 200 metros de pixel comparando os dados médios anuais de vazão simulada relacionada aos medidos, conforme tabela 25.

4.1.3 Análise das distintas resoluções sem calibração, parâmetro análise de regressão.

Na presente etapa será realizada uma análise de regressão relacionando dados simulados com distintas resoluções relacionado a dados medidos a campo, trabalhamos com valores médios mensais de cada resolução simulada e o valor médio de dado coletada pela Agência Nacional das Águas (ANA), para calcular a médias anuais utilizamos a seguinte equação.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (41)$$

onde:

\bar{x} = Média aritmética mensal

x_i = valor de vazão mensal.

n = número de observações.

A Avaliação através da regressão simples correlacionando os dados médios mensais em um período de um ano.

Realizou-se teste da correlação em função de regressão linear Simples, onde se analisou os seguintes parâmetros:

- Grau de significância em nível de 5% ($Pr > F$) = onde o modelo para ser significativo teria que ter valores menores ou iguais a 5%.
- Grau de ajustamento do modelo (R^2) = Este determina o percentual de ajustamento do modelo, ou seja, expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão.

- Erro padrão da estimativa (S_{yx}) = Esta é uma medida de dispersão entre os dados observados a campo e os estimados pela regressão simples, quanto menor o valor melhor o ajuste.

A seguir apresentam-se as formulações utilizadas.

$$R^2 = \left(1 - \frac{SQ_{\text{Resíduo}}}{SQ_{\text{Total}}} \right) \times 100 \quad (42)$$

Onde:

R^2 = Grau de ajustamento da equação.

SQ = Soma dos quadrados do resíduo.

SQ = Soma dos quadrados totais.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (43)$$

Onde:

S_{yx} = Erro padrão da estimativa

x_i = Valor da variável analisada.

\bar{x} = média da variável analisada

n = número de amostras

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (44)$$

Onde:

CV = Coeficiente de variação.

S = Desvio padrão

\bar{x} = Média dos dados.

4.1.3.1 Produção de sedimentos

Executou-se a análise de regressão com os dados médios mensais de cada resolução espacial relacionado aos dados de médias anuais de coleta a campo, trabalhando-se com três parâmetros, dados simulados, dados medidos e chuvas, onde iremos tentar estabelecer uma correlação na regressão entre o fator chuva e a vazão e aporte de sedimentos.

Os dados de sedimentos analisados são valores médios dos mensais dos anos de 2002 a 2012.

Tabela 26 - Dados médios mensais de sedimentos produzidos com distintas resoluções.

Mês	ANO	S10	S30	S50	S100	S200	SUFSM	CHUVA
1	1	25356.53	24884.91	23666.85	16456.52	706.59	457706.4	147.140
2	2	55244.34	52379.13	49255.27	32467.52	1287.86	596.31	154.836
3	3	76057.12	104555.4	67866.98	44771.56	1095.99	342.83	137.836
4	4	8181.17	7763.36	7276.88	4724.49	24115.2	1033.09	239.633
5	5	2593.59	2909.67	2255.27	1683.02	23111.27	7996.22	209.327
6	6	4817.12	5055.62	5311.98	2453.44	13016.19	24688.45	153.031
7	7	9711.13	9869.69	9632.7	6497.3	22152.31	21650.66	190.411
8	8	1509.85	16791.13	1671.9	1251.7	5675.28	9206.11	157.316
9	9	2124.61	2074.72	2055.24	1383.78	16739.05	21535.58	187.249
10	10	1725.58	1719.33	1704.61	1208.83	3458.27	51777.71	228.440
11	11	2707.61	2661.82	2601.85	1820.8	4464.6	17131.2	156.641
12	12	21770.33	20422.1	19479.23	13162.52	1091.33	7149.48	146.876

Após selecionou-se as correlações que iria se estabelecer entre os distintos parâmetros, conforme as tabelas.

Tabela 27 - Análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes sedimentos simulados

Resolução/Parâmetro	Pr>F	R ²	Coef.Var	Syx	Equação
10	0,898	0,0017	260,61	134827	Y= 47841,0 + (0,22059 x)
30	0,960	0,0003	260,80	134925	Y= 53172,0 + (-0,06868 x)
50	0,870	0,0028	260,47	134753	Y= 46637,0 + (0,31730 x)
100	0,829	0,0048	260,20	134616	Y= 45019,0 + (0,63014 x)
200	0,341	0,0908	248,71	128670	Y= 91643,0 + (-4,09618 x)

Após executarmos a regressão linear Simples, relacionando os dados simulados com dados medidos obtêm-se os seguintes resultados.

- Grau de significância em nível de 5% ($Pr>F$), onde o modelo para ser significativo teria que ter valores menores ou iguais a 5%, observa-se que todos estão muito acima onde produto com resolução de 200 metros apresentou 34,1 %, ou seja todos são não significativos.

- Grau de ajustamento do modelo (R^2) determina o percentual de ajustamento do modelo, ou seja, expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão, novamente o melhor valor temos para a resolução de 200 metros com 9,08% o que determina a completa falta de ajustamento do modelo.

- Erro padrão da estimativa (S_{yx}) é uma medida de dispersão entre os dados observados a campo e os estimados pela regressão simples, quanto menor o valor melhor o ajuste, todos os valores muito altos o que caracteriza a falta de ajuste dos modelos.

Coeficiente de variação - Todos se apresentam com valores extremamente altos, indicativo da variabilidade de produção de sedimentos nos diferentes meses, não demonstrando correlação com a chuva.

Conforme se observa em função dos resultados a Análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes sedimentos simulados demonstra que não ocorreu ajuste, basicamente em virtude da alta variabilidade dos dados não sendo possível qualquer tipo de ajuste, ou seja, temos uma baixa correlação.

Na tabela 28 temos a análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes chuva e sedimentos simulados, onde a partir da inserção de um novo parâmetro, chuva, tentou-se estabelecer um nível maior de correlação.

Tabela 28 - Análise de Regressão relacionando variável dependente sedimentos medidos e variáveis independentes chuva e sedimentos simulados

<i>Resolução/Parâmetro</i>	<i>Pr>F</i>	<i>R²</i>	<i>Coef.Var</i>	<i>S_{yx}</i>	Equação
10	0,773	0,0554	267,21	138243	238037+(-0,51857 x)+(-1008,088 y)
30	0,713	0,0723	264,82	137005	274566+(-0,77536 x)+(-1175,728 y)
50	0,780	0,0537	267,46	138370	233227+(-0,50838 x)+(-986,326 y)
100	0,789	0,0512	267,81	138551	223045+(-0,55802 x)+(-941,023 y)
200	0,649	0,0914	262,08	135587	109858+(-3,80258 x)+(-119,935 y)

- Grau de significância em nível de 5% ($Pr > F$) ,novamente observa-se a não significância de todas as resoluções.

- Grau de ajustamento do modelo (R^2), apresentam-se baixos, indicando nenhum grau de ajustamento.

- Erro padrão da estimativa (Syx), todos bastante altos.

Coefficiente de variação - Todos se apresentam com valores extremamente altos, indicativo da variabilidade de produção de sedimentos nos diferentes meses, não demonstrando correlação com a chuva, a tentativa de inserção da variável chuva não foi significativa para melhorar o ajustamento do modelo, observando-se que as variáveis inerentes ao transporte de sedimentos, como surlag (coeficiente de retardo do escoamento superficial) e sed_{stor} (sedimento retardado no dia anterior) devem ser bem calibradas e tem grande influência no ajustamento do modelo.

4.1.3.2 Vazão Líquida

A partir da aplicação da equação das médias, obteve-se a tabela 29, observando-se que o primeiro mês foi descartado devido às falhas ocorridas.

Tabela 29- Médias mensais de vazão m^3/s , e chuvas em mm.

Mês	ANO	R10	R30	R50	R100	R200	ANA	CHUVA
1	1989	1749.2	1818	1871.5	1583.4	1917.8	737.67	140.099
2	1990	2752.7	2721	2662.5	2127.3	1860.8	540.28	143.042
3	1993	2388.1	2341.5	2292.5	1820.8	2754.8	1180.2	224.864
4	1994	2311.6	2286.9	2273.3	1823.2	3224.2	1515.2	177.785
5	1995	2334.6	2301.6	2284.2	1825.1	3449.9	2181.7	167.373
6	1999	2084.8	2048.5	2048.5	1645	3700.1	2660.3	173.795
7	2002	1743.4	1706.4	1707.1	1404.3	3241.4	1392.3	143.324
8	2006	1837.5	1795.6	1785.5	1423.1	3205.5	1704.8	175.381
9	2008	1733.5	1711.6	1703.1	1358.3	2982.8	2720.5	214.050
10	2010	2444.6	2412.4	2365.2	1881.1	3095.1	1504.8	152.215
11	2012	2319.9	2365.2	2381.2	1973.5	2672.7	1534.2	140.002

Executarmos a regressão linear da variável resolução média anual relacionado à vazão média anual obteve-se as tabelas 30 e 31.

Tabela 30 - Análise de Regressão relacionando variável dependente vazão medida e variável independente vazão simulados.

<i>Resolução/Parâmetro</i>	<i>Pr>F</i>	<i>R²</i>	<i>Coef.Var</i>	<i>Syx</i>	Equação
10	0,300	0,110	42,87	688,72	Y= 3088,08537 + (-0,68764 x)
30	0,244	0,146	42,14	677,02	Y= 3283,58935 + (-0,68764 x)
50	0,227	0,157	41,87	672,79	Y= 3437,10242 + (-0,86141 x)
100	0,165	0,202	40,74	654,55	Y= 3743,47571 + (-1,24602 x)
200	0,004	0,619	28,14	452,12	Y= -1126,46623 + (0,93640 x)

- Grau de significância em nível de 5% ($Pr>F$) , onde o modelo para ser significativo teria que ter valores menores ou iguais a 5%, obteve-se para a resolução de 200 metros um valor de 4%, ou seja existe correlação entre variável dependente vazão medida e variáveis independentes vazão simulados.é significativa a um nível de 5%, as demais resoluções não são significativas.

- Grau de ajustamento do modelo (R^2) determina o percentual de ajustamento do modelo, ou seja expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão, novamente o melhor valor temos para a resolução de 200 metros com 61,9% , ou seja a regressão explica 61,9% da variação dos dados.

- Erro padrão da estimativa (Syx), valores médios, a resolução de 200 metros apresenta o melhor resultado.

Coeficiente de variação - Todos apresentam valores médios, indicativo da variabilidade de produção de sedimentos nos diferentes meses.

Tabela 31 - Análise de Regressão relacionando variável dependente vazão medidos e variáveis independentes vazão simulados e chuvas

<i>Resolução/Parâmetro</i>	<i>Pr>F</i>	<i>R²</i>	<i>Coef.Var</i>	<i>Syx</i>	Equação
10	0,240	0,294	40,63	652,84	1211,52+(-0,60265x)+(-10,05865 y)
30	0,232	0,306	40,31	647,60	1395,081+(-0,65651x)+(9,58974 y)
50	0,234	0,304	40,36	648,54	1520,71+(-0,69425 x)+(9,27229 y)
100	0,216	0,318	39,95	641,86	1849,23+(-0,96837 x)+(8,42289 y)
200	0,012	0,667	27,90	448,28	-1798,26+(0,85083 x)+(5,47372 y)

Grau de significância em nível de 5% (Pr>F) , a correlação entre variável dependente vazão medida e variáveis independentes vazão simulada e chuvas não é significativa para todas resoluções.

- Grau de ajustamento do modelo (R^2), expressa a quantidade da variação total explicada pela regressão, novamente o melhor valor temos para a resolução de 200 metros com 66,7%.

- Erro padrão da estimativa (S_{yx}), valores médios, a resolução de 200 metros apresenta o melhor resultado.

Coeficiente de variação - Todos apresentam valores médios, indicativo da variabilidade de produção de sedimentos nos diferentes meses.

4.1.3.3 Equação de Regressão Linear gerada para ajustamento de parâmetros

Após realizarmos a análise de regressão relacionando variável dependente vazão medida e variáveis independentes vazão simulados e analisarmos a um grau de significância a nível de 5% , onde o modelo para ser significativo teria que ter valores menores ou iguais a 5%, obteve-se para a resolução de 200 metros um valor de 4%, ou seja existe correlação entre variável dependente vazão medida e variáveis independentes vazão simulados,é significativa a um nível de 5%, gerando-se a seguinte equação de ajuste. $Y = -1126,46623 + (0,93640 x)$.

A partir da aplicação desta regressão sobre os dados simulados com resolução de 200 metros dos anos de 2002, 2006, 2008, 2010, e 2012, analisaram-se os valores gerados e compararam-se os mesmos com valores medidos e estabeleceu-se o coeficiente de eficiência da regressão obtendo-se o resultado demonstrado na tabela 32. Observa-se que somente no ano de

2002 a regressão foi eficiente em ajustar os dados, estando os mesmos dentro do limiar determinado pela bibliografia.

Tabela 32- Coeficiente de eficiência da regressão.

<i>ANO</i>	<i>2002</i>	<i>2006</i>	<i>2008</i>	<i>2010</i>	2012
COE	0,45	0,50	0,07	0,10	0,28

4.2 Resultados sobre Objetivo 2

4.2.1 Resultados sobre análise de sensibilidade.

Conforme previsto na metodologia seguiu-se algumas etapas para execução da análise de sensibilidade, onde primeiramente executou-se o modelo de simulação e este definiu os parâmetros mais sensíveis conforme tabela 32, em uma ordem crescente de relevância separados em vazão e sedimentos, Os resultados das simulações das vazões ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e das produções de sedimentos ($\text{t km}^{-2} \text{ano}^{-1}$) anuais.

Tabela 33 - Relação dos parâmetros selecionados com seus níveis de sensibilidade.

<i>Parâmetro Analisado</i>	<i>Intervalo de Calibração</i>		<i>Nível de Sensibilidade para Vazão</i>	Nível de Sensibilidade Sedimentos
Alpha Bf	0	1	8	10
Canmx	0	10	2	5
CN2	-25	25	7	1
Sol K	-25	25	5	9
Sol Z	-25	25	4	7
Sol Awc	-25	25	3	6
Slope	-25	25	6	3
Usle P	0	1	9	2
Esco	0	1	1	8
Surlag	0	4	1	4

Onde temos:

Alpha Bf - : fator do fluxo de base, ou constante de recessão. Define-se como a taxa na qual a água subterrânea retorna ao rio (dias);

Canmx - Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo mm varia de 0 a 10.

CN2- Valor da curva número (CN) do método do Soil Conservation Service (SCS) - relacionado diretamente ao grau de antropização da região, de 35 a 98

Sol K- Condutividade do solo em mm/h, pode variar de -0.5 a 0.5.

Sol Z - Profundidade do solo mm, 0 a 3000.

Sol Awc - Capacidade de armazenamento de água no solo mm, varia de -0,2 a 0,2

Slope -declividade média, -0,1 a 0,1.

Usle P - Fator prática conservacionista, equação universal de perdas de solo -0,5 a 0,5

Esco - Fator de compensação da evaporação do solo, 0 a 1

Surlag - Tempo de retardo do escoamento superficial Dia, 0 a 10.

4.2.2 Resultados sobre Calibração

O processo de calibração foi realizado de forma separada para vazão e para produção de sedimentos, onde se utilizou o período de 1989 a 2001 para calibrar.

Após simulação inicial, alterando-se apenas parâmetros já pré-identificados para a realidade da bacia Guaporé, onde executou-se:

a- comparação dos dados medidos e simulados.

b- verificação dos ajustes necessários

c- identificação dos parâmetros que melhor se enquadrariam aos ajustes necessários.

d- teste dos parâmetros, utilizando-se novos valores.

e- utilização da ferramenta de análise automática de sensibilidade dos parâmetros, para comparação dos resultados.

Para determinarmos quais os melhores valores para cada parâmetro executava-se a simulação observava-se os resultados gerados, compara-se com dados medidos, calcula-se o parâmetro estatístico de análise COE, se estes não forem satisfatórios, ou seja, COE deve ser maior que 0,50 substituem-se os valores dos parâmetros de calibração, esta rotina foi

executado várias vezes até chegarmos aos valores determinados na tabela 33 para vazão e 34 para sedimentos. .

Os parâmetros selecionados para serem alterados foram: número da curva (CN), a capacidade de água disponível (SOL_AWC), a declividade média (SLOPE), a condutividade hidráulica do solo (SOL_K), a profundidade das camadas do solo (SOL_Z), o fator alfa de recessão do fluxo de base (ALPHA_BF), o fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), o armazenamento de água máximo na copa das árvores (CANMX) e, o tempo de retardo do escoamento superficial (SURLAG) e o fator de práticas de manejo da USLE (USLE_P) no caso da produção de sedimentos, obteve-se o seguinte resultado após análise de sensibilidade.

Tabela 34 - Valores calibrados para Vazão seguidos do COE.

<i>Parâmetro Analisado</i>	<i>Intervalo de Calibração</i>		Valores ajustados
Alpha Bf	0	1	0.74
Canmx	0	10	5.3
CN2	-25	25	13.0
Sol K	-25	25	15.0
Sol Z	-25	25	3.3
Sol Awc	-25	25	3.9
Slope	-25	25	15.0
Usle P	0	1	0.28
Esco	0	1	0.11
Surlag	0	4	3.10

<i>Parâmetro/ano</i>	<i>1991</i>	<i>1993</i>	<i>1995</i>	<i>1999</i>	2001
COE	0,52	0,47	0,64	0,61	0,59

Tabela 35 - Valores calibrados para Produção de Sedimentos, seguidos do COE

<i>Parâmetro Analisado</i>	<i>Intervalo de Calibração</i>		Valores ajustados
Alpha Bf	0	1	0.41
Canmx	0	10	1.3
CN2	-25	25	3.70
Sol K	-25	25	6.40
Sol Z	-25	25	6.5
Sol Awc	-25	25	9.5
Slope	-25	25	9.2
Usle P	0	1	0.25
Esco	0	1	0.64
Surlag	0	4	3.0

<i>Parâmetro/ano</i>	<i>1991</i>	<i>1993</i>	<i>1995</i>	<i>1999</i>	2001
COE	-23,14	-9,47	-10,64	-0,61	-0,59

Os valores ajustados para sedimentos que se apresenta na tabela 34 são os que apresentaram melhores resultados para calibração, porém observou-se na etapa posterior de validação que o modelo não conseguiu ser validado.

Depois de selecionado o parâmetro de calibração do modelo partiu-se para validação.

4.2.3 Resultados sobre Validação

O processo de validação foi realizado somente para Vazão Líquida, produção de sedimentos não se conseguiu realizar a calibração do modelo, conseqüentemente não foi possível validar.

Para validação foram selecionados sete anos para realizarmos a validação do modelo, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 2012 e 2013, seguindo o proposto na metodologia utilizarmos

o Coeficiente de Eficiência (COE) para validarmos, apresentou-se os seguintes resultados conforme a tabela 35 para vazão líquida.

Tabela 36- Coeficiente de eficiência determinado para dados de vazão líquida.

<i>Parâmetro/ano</i>	<i>2002</i>	<i>2004</i>	<i>2006</i>	<i>2008</i>	<i>2010</i>	<i>2012</i>	2013
COE	0,57	0,86	0,40	0,83	0,65	0,68	0,78

5. DISCUSSÕES

As discussões da presente tese irão ser analisadas individualmente em função dos objetivos propostos ficando denominados de:

Discussão objetivo 1- onde será analisada a resposta de simulação do Modelo SWAT sem calibração na produção de sedimentos e vazão líquida alterando a resoluções espacial do pixel de 10, 30, 50, 100 e 200 metros das imagens de uso e ocupação, solos e declividade comparando resultados obtidos na simulação, com dados medidos em um posto hidrossedimentométrico.

Discussão Objetivo 2- Analisar as resposta da simulação na estimativa de vazão líquida e produção de sedimentos do modelo calibrado comparados com dados medidos em postos hidrossedimentométricos

5.1 Discussão sobre Objetivo 1

Após os três métodos de análise ser aplicados, percentagem, estatístico (COE) e análise de regressão simples, utilizou-se o resultado destes como critério para determinar qual resolução de imagens apresentou melhor desempenho, o somatório das pontuações que estas tiveram em cada processo determinou o critério de classificação, o menor valor total indica o melhor desempenho.

A imagem com resolução de 200 metros com um valor total de 6 apresentou como o produto indicado a ser utilizado nos demais processos de calibração, ficando segundo melhor produto 100 metros e após a de 50, 10 e por ultimo a de 30 metros, conforme tabela 37.

Tabela 37 - Análise de desempenho das distintas resoluções pelos três métodos avaliados.

<i>RESOLUÇÃO ESPACIAL</i>		<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	200
Vazão Líquida	Percentagem	4	3	5	2	1
	Estatístico (COE)	4	3	5	2	1

Aporte Sedimento	Regressão	4	5	3	2	1
	Porcentagem	3	5	4	2	1
	Estatístico (COE)	4	5	3	2	1
	Regressão	5	4	3	2	1
TOTAL		24	25	23	12	6

A discussão referente à imagem com 200 metros de resolução como sendo a que apresentou melhor resultado foi feita sob o âmbito dos três produtos utilizados nas rotinas de simulação, imagem de declividade (MDT), imagem de uso e ocupação do solo, imagem de solos.

5.1.1 Modelo Digital do terreno (MDT) com 200 metros de resolução.

O modelo digital do terreno, ou modelo de elevação do terreno é composto por informações planialtimétricas que estão diretamente ligadas a equação que simula a perda e deslocamento de água e sedimentos, onde temos o fator LS, comprimento de rampa e declividade, o aumento do comprimento de rampa e da declividade podem produzir maior velocidade de escoamento superficial e erosão, a perda de solo é mais sensível às mudanças de declividade do que a mudanças no comprimento de rampa (MCCOOL et al. 1987; VAN REMORTEL et al. 2004).

O modelo SWAT aplica a MUSLE para cada HRU, considerando o comprimento de rampa a distância entre os pontos extremos da HRU, e a declividade baseia-se na relação entre a diferença altimétrica e a distância entre esses pontos. Esse método simplificado de cálculo do fator LS pode explicar a superestimação obtida, pois o fator LS utilizado pela MUSLE foi obtido através de estudos realizados em rampas uniformes de 22,1 m de comprimento e 9,0 % de declividade, o que não ocorre nas HRU.

Entende-se a partir disto que quando trabalhamos com uma resolução espacial de 200 metros e o modelo assume o ponto de maior altitude e o de menor altitude na HRU vai ter uma menor variabilidade altimétrica que se tomássemos pixels com resolução de 10 metros, conseqüentemente a menor resolução deve levar a superestimar a produção de sedimentos ao contrario da resolução de 200 metros, porém ambas superestimam a produção devido aos

valores de estudo para determinar a equação trabalhar com comprimento de rampa de 22,1 metros uniformes e com 9% de declividade.

Ao utilizar somente os extremos de cada HRU, dificilmente haverá deposição, pois os pontos selecionados são o mais alto e o mais baixo, sempre positivo, o que não é verdade, pois o terreno não é uniforme ao longo da rampa considerada, havendo pontos de deposição, como, por exemplo, os camalhões utilizados no cultivo do fumo e o pé das encostas de superfície côncavas. Segundo Mansor et al. (2002),

A determinação dos fatores L e S apresenta dificuldades em virtude do declive, que pode ser reto, côncavo, convexo, a análise desses fatores foi estudada por diversos autores,

McCool et al. (1987, 1989) propuseram o cálculo dos fatores L e S em função da relação da erosão entressulcos e em sulcos e para valores de declividade superiores a 9%, ou seja temos vários estudos que demonstram a importância dos fatores topográficos na equação universal de perdas de solo, que é um dos parâmetros básicos que o simulador utiliza para determinar transporte de sedimento

Quando pensamos em um produto raster este é formado por uma matriz de linhas e colunas onde o pixel é a unidade de representação, que matematicamente se expressa pela função $f(x,y)$, onde o fator f, denominado fator de brilho assume as características referentes ao parâmetro a ser analisado.

As células da grade devem ser pequenas o suficiente para obter o uso homogêneo terra, solo e características topográficas, e grandes o suficiente para manter a quantidade de dados necessários para o funcionamento do simulador a um nível razoável, grandes células pode fazer com que se captura um alto nível de heterogeneidade espacial.

Mitasova et al. (1996) avaliaram que MDT a partir de 30 metros (USGS) são insuficientes para gerar Fator LS precisos.

Woodcock e Strahler (1987) basearam-se na variância local para a definição do tamanho de célula mais apropriado.

A resolução espacial que melhor apresenta resultados depende da variabilidade espacial, erros associados e tamanho do dado, quanto mais complexo for o relevo maiores serão as generalizações de informação que sofrera o modelo digital do terreno

Baseado nos resultados dos três processos utilizados, percentagem, estatístico (COE) e em função da análise de regressão, todos resultados indicaram a imagem com resolução de 200 metros de pixel como sendo a que aproximou com maior rigor os valores simulados dos calculados, em relação as imagens de menor resolução, tabela 32 ,o calculo do transporte de sedimentos e vazão utilizados no SWAT trabalham com a equação universal de perdas de

solo (DESMET E GOVERS, 1996) e propuseram um formulação matemática para calcular o fator de comprimento de rampa a partir da área de contribuição considerando as formulações desenvolvidas por Foster & Wischmeier (1974):

$$L_{i,j} = [(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}] / [D^{m+2} \cdot x_{i,j}^m \cdot (22,13)^m] \quad (45)$$

Onde:

$A_{i,j-in}$ = área de contribuição da célula com coordenada (i, j) (m²);

D = tamanho da célula (m);

m = coeficiente função da declividade para grade de células com coordenadas (i, j);

x = coeficiente função do aspecto para grade de células com coordenadas (i, j);

a- Área de contribuição da célula com coordenada ($A_{i,j-in}$), esta é uma medida de fluxo superficial, e representa áreas de maior concentração do fluxo de água em um grid de células, ou seja seria a área de contribuição direta no fluxo de células analisado, este é muito importante pois vai descrever o processo erosivo associado ao fluxo laminar e sulcos em encostas irregulares e íngremes, sendo um fator que está relacionado diretamente a resolução espacial do pixel, menores resoluções como as de 10 metros apresentam um maior nível de detalhamento que a de 200 metros utilizado no trabalho.

Se analisarmos a forma do relevo que compõem a área de contribuição está pode gerar resultados diferenciados na equação, onde formas mais côncavas determina uma maior convergência das águas e materiais transportados aumentando a força de descompactação e erosão dos solos, apresenta-se a formação de sulcos e ocorre a deposição de sedimentos no ponto de menor cota, desta forma resoluções espaciais menores deveriam apresentar resultados mais precisos, e menores valore de vazão e produção de sedimentos, ja a forma plana não deveria ser tão influenciada pela resolução do pixel em função da uniformidade e continuidade do desenvolvimento da forma do relevo, e a forma convexa da mesma maneira que a côncava deveria ser influenciada pela resolução, está apresentando um processo de divergência no fluxo das águas, e um processo de erosão mais uniforme e distribuído na superfície.

b- Tamanho da célula (m) - determinado pela área que cada pixel ocupa, a lógica nos diz que quanto menor for o tamanho do pixel, neste estudo 10 metros, mais representativo será a abstração das informações do mundo real para o digital, no caso da equação utilizado pelo SWAT como observamos na tabela 36 demonstram que a imagem com 200 metros de resolução espacial gerou resultados mais precisos que a de 10 metros, isto devido ao modelo através da equação de perda de solo consegue manipular matematicamente os dados de forma mais próxima da realidade quando se trabalha com um processo de generalização espacial, ou seja o nível de detalhamento das informações, neste caso de fatores topográficos, é melhor representado com menor nível de detalhamento espacial, este resultado é válido para uma bacia de grande porte como está em estudo, 2020 km², acredito que para uma bacia de pequeno porte a realidade poderia ser outra necessitando-se de mais estudos.

c- Coeficiente função da declividade para grade de células com coordenadas (m)- obtido a partir de determinadas classes de declividade, sendo:

m = 0,5 se a declividade for > 5%;

m = 0,4 para o intervalo de 3 a 5%;

m = 0,3 para o intervalo de 1 a 3%; e

m = 0,2 para grau de declividade < 1%.

Para o cálculo da declividade Desmet & Govers (1996) empregaram o algoritmo descrito por Zevenbergen & Thorne (1987):

$$G_{ij} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (46)$$

Onde:

Gx = gradiente na direção x (m/m);

Gy = gradiente na direção y (m/m).

Conforme a figura 31 o comportamento da área de contribuição em relação ao comprimento de rampa e coeficiente “m”, verifica-se que com o aumento do comprimento de rampa e da área de contribuição temos um aumento no fator m, deve-se levar em consideração as características do relevo, pois, em situações onde ocorre pouca variação no relevo o fator m não sofrera tanta influência.

Observa-se aqui também que o fator resolução espacial influencia de forma direta, onde um pixel com resolução de 10 metros representa uma menor área no terreno que um com 200 metros, conseqüentemente a variabilidade do pixel com 200 metros em situações onde ocorre processos erosivos ou mudanças no relevo não irá representar a realidade de campo, apresenta uma alta heterogeneidade espacial de informações em um pixel, recomenda-se em situações de análise de grandes bacias ou onde ocorre alterações significativas da superfície do relevo em curtas distâncias que se trabalhe com valores de m até 0,5.

A declividade exerce uma forte influência no comprimento de rampa para locais com uma área de contribuição alta constata-se que a maior variabilidade entre os dados é obtida com a alternância do coeficiente de declividade (m). (Figura 25).

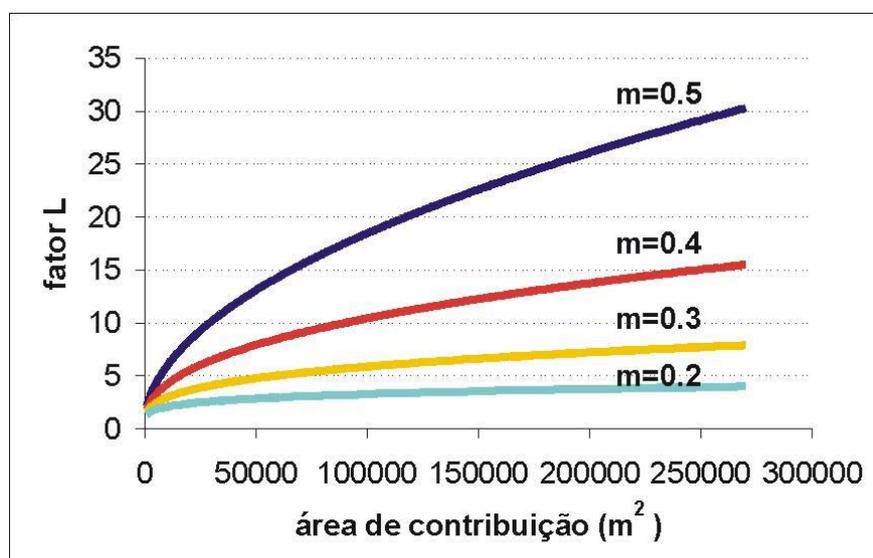


Figura 25 - Relação do fator L com a área de contribuição e o coeficiente, função da declividade segundo método Desmet e Govers (1996).

Temos o coeficiente (x) que é função da direção de fluxo, obtido pela equação:

$$x = \text{sen} \alpha + \cos \alpha \text{ onde, } \alpha \text{ corresponde ao ângulo da direção de fluxo (47)}$$

O valor de “ x ” expressa uma relação da dimensão do comprimento de rampa contida dentro do pixel. Essa relação varia entre a dimensão de um lado do pixel e a sua diagonal variando entre zero e noventa graus, os valores de “ x ” variam de 1, quando a direção de fluxo

for paralela as lados do pixel, até 1,414214 quando está na posição diagonal do pixel figura 32.

A introdução de “x” na formulação ocasiona uma variância nos dados, a resolução espacial do pixel não irá influenciar nos valores em função que já estão estabelecidos os valores mínimos e máximos para qualquer resolução.

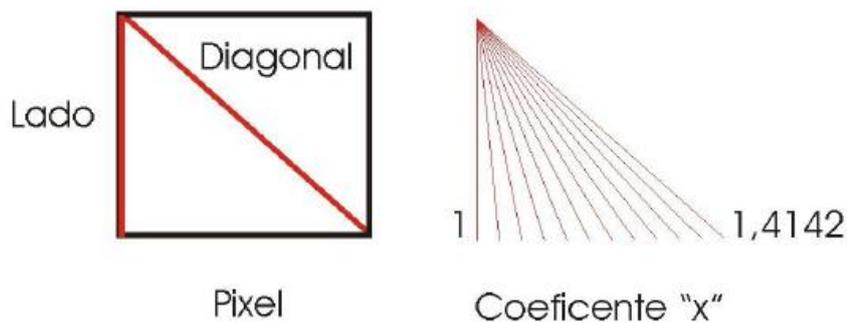


Figura 26- Relação do coeficiente x e as dimensões do pixel

Fonte: Adaptado Desmet e Govers (1996).

Baseado nos diversos fatores observa-se que o produto utilizado, o modelo numérico do terreno, que tem sua origem de dados no levantamento da NASA já apresenta um erro planialtimétrico, que vai ser transferido para os cálculos da equação universal de perda de solos, o comprimento de rampa, a declividade vão ser afetados, isto demonstra ser mais acentuado em imagens com menor resolução como a de 10 metros, já não tão marcantes na resolução de 200 metros.

5.1.2 Imagem de uso e ocupação do solo com 200 metros de resolução.

A imagem de uso e ocupação do solo sofreu um processo de classificação enfatiza-se que quanto menor a resolução maior será o nível de detalhamento, ou seja, obteremos um nível de informação mais homogêneo por pixel, no caso das imagens utilizadas para simulação a menor resolução somente teve melhores resultados anterior ao processo de classificação, na identificação dos diferentes usos do solo, pois com o seu melhor nível de

detalhamento permite uma melhor distinção dos alvos, após a classificação ocorreu um processo de distribuição dos pixels em intervalos de classes, onde as classes Urbanização, plantio 1 e 2, floresta abrangeram toda a amplitude espectral da vasta gama de objetos que existe sobre a superfície da área do projeto, ocorreu uma simplificação na informação de brilho do pixel, o que fez com que a resolução de 10 metros perde-se a importância e a de 200 metros torna-se adequada.

Na presente pesquisa deve-se levar em consideração um ponto crucial antes e após a classificação da imagem, que é a variabilidade de usos sobre a área do projeto, quando trabalhamos com vastas áreas onde o uso e ocupação sofre poucas alterações a resolução espacial passa a ser não significativa, é o que observamos na parte central da bacia com grandes propriedades e homogeneidade de plantios, ao observarmos a parte sul da bacia, lá ocorre uma grande diversificação de uso alternando entre pequenas propriedades, áreas de encosta com vegetação densa, áreas de campo com vegetação sub-arbustiva e gramíneas, e uma grande variedade de cultivos com distintos estados fisiológicos, o que faz com que a resolução de 200 metros não consiga representar a verdadeira situação do uso do solo como poderia uma com 10 metros de resolução.

O simulador SWAT determina que as imagens estejam na mesma resolução espacial, recomenda-se para pequenas bacias uma classificação do uso e ocupação mais detalhada sem o processo de generalização aplicado por diversos classificadores em função da incerteza gerada por alvos com sobreposição de resposta espectral.

No presente estudo uma determinação de classes mais detalhada acarretaria em um período de revista a campo elevado para identificar alvos não determinados, imagens de satélite atualizadas com a programação de imageamento, e alta capacidade de processamento por parte do hardware.

A metodologia proposta para o uso da imagem previa uma redução de custos de aquisição de imagens de alta resolução espacial através da utilização dos produtos disponibilizados no servidor de imagens do Google Earth, porém junto com esta gratuidade estão os problemas relacionados à falta de sensores calibrados, deformações espaciais, multi-temporalidade nas imagens, o que acarreta em uma necessidade de técnica mais apurada para usufruirmos da informação com maior precisão.

Observa-se que todo o cuidado e demora que tivemos nos processos iniciais para elaboração das imagens para serem simuladas não trouxeram os resultados esperados via que os produtos que apresentaram melhor desempenho foi o das imagens com resolução espacial de 200 metros.

A resolução espacial apresenta influencia não somente na área interna do pixel, mas também no limite de borda, pois uma célula que representa 200 metros no terreno pode ter o limite deslocado nesta mesma distância, quando pensamos em informações hidrológicas ou de uso e ocupação pode influenciar de maneira significativa na informação simulada.

Quando analisamos a precisão espacial da informação está é afetada, observando-se que as imagens utilizadas são produtos georreferenciados, onde as deformações espaciais pertinentes aos parâmetros de correção, omega, pi e kappa da câmera e da órbita, do terreno não foram corrigidos, tem-se que levar em consideração que a imagem de uso e ocupação do solo no momento em que o simulador hidrológico realiza o cruzamento de planos de informação através da álgebra de mapas quando trabalha com um pixel de 10 metros apresenta uma maior acurácia posicional de informação que um de 200 metros, porem ambos não são precisos.

Como na imagem de solos, a de uso e ocupação demonstrou melhores resultados com a resolução de 200 metros basicamente devido ao processo de simplificação da informação executado pelas rotinas de calculo do SWAT.

Necessita-se de novas pesquisas com resoluções espaciais maiores que 200 metros para conclusões definitivas quanto a melhor resolução de simulação para grandes bacias porém em função dos resultados obtidos observou-se que valores de 10,20,30 e 50 metros não apresentaram boas simulações, e para pequenas bacias com tamanho médio de 100 Km² está realidade pode ser diferente necessitando novos estudos.

5.1.3 Imagem de Solos com 200 metros de resolução

O produto que sofreu menor influencia em função das diferentes resoluções devido a alta homogeneidade e baixa variabilidade espacial dos solos, ou seja, temos grandes áreas com a mesma classe, o que faz com que a resolução do pixel não seja significativa, o limite de transição entre os solos não apresenta exatidão onde uma imagem de 200 metros não vai gerar diferença considerável quando comparada com uma de 10 metros nas rotinas de calculo do SWAT.

5.2 Discussão sobre Objetivo 2

5.2.1 Discussão sobre análise de sensibilidade.

Conforme previsto na metodologia seguiu-se algumas etapas para execução da análise de sensibilidade, e esta foi classificada em ordem decrescente de relevância pelo simulador, executou-se a simulação e a partir desta definiu-se os parâmetros que tiveram seus valores alterados no modelo para realizar a calibração, variando-se os valores de entrada determinados na simulação em $\pm 10\%$ do valor do parâmetro que a análise de sensibilidade indicou, conforme recomendações de Jha (2009), Schmalz & Fohrer (2009) e Van Griensven (2009).

Para a produção de sedimentos os mais sensíveis foram a curva número, fator prática conservacionista, declividade e tempo de retardo do escoamento superficial, já para vazão tivemos o fator de evaporação do solo, tempo de retardo do escoamento superficial, capacidade de armazenamento de água no solo, profundidade do solo e armazenamento de água no dossel vegetativo,

Conforme alguns autores que estudaram o SWAT, os parâmetros mais sensíveis estão relacionados com as propriedades físicas do solo, como densidade, condutividade hidráulica e, particularmente, capacidade de água disponível, além do número da curva, o qual se relaciona com o solo e a vegetação (JHA, 2009; CIBIN et al. 2010).

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que a análise de sensibilidade sofreu uma maior influência pelo uso e ocupação do solo, topografia, principalmente o fator LS e outros fatores físicos e climáticos.

Quanto a análise de sensibilidade da produção de sedimentos, os parâmetros indicados não trouxeram bons resultados na calibração, o SWAT é sensível a uma esparsa quantidade de variáveis de entrada relacionadas a vegetação, manejo e tipo dos solos, clima, aquífero, canal e reservatório (ADRIOLO et al. 2008; JHA, 2009; REUNGSANG et al. 2009; JEONG et al. 2010). Em função deste grande número de parâmetros de entrada é possível que existam outros fatores relevantes que devem ser levados em consideração, o que acarreta em um maior tempo para estudar e analisar os distintos fatores deve-se levar em consideração a escala de representação dos dados, pois, em se tratando de uma bacia com 2020 Km², e sendo o

transporte de sedimentos mais difícil de ser simulado, este também apresenta maior complexidade na análise de sensibilidade e calibração.

5.2.2 Discussão sobre Calibração

O processo de calibração foi realizado de forma separada para vazão e para produção de sedimentos, onde se utilizou o período de 1989 a 2001 para calibrar a vazão e 1989 a 2001 para calibração de sedimentos.

Após a simulação inicial finalizada a análise de sensibilidade indicou os parâmetros mais sensíveis que foram utilizados para a calibração do modelo sendo número da curva (CN), a capacidade de água disponível (SOL_AWC), a declividade média (SLOPE), a condutividade hidráulica do solo (SOL_K), a profundidade das camadas do solo (SOL_Z), o fator alfa de recessão do fluxo de base (ALPHA_BF), o fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), o armazenamento de água máximo na copa das árvores (CANMX) e, o tempo de retardo do escoamento superficial (SURLAG) e o fator de práticas de manejo da USLE (USLE_P).

5.2.2.1 Calibração para produção de Sedimentos (SED_OUT)

O SWAT calcula o aporte de sedimentos através da Equação Universal Modificada de Perda de Solo – MUSLE, onde após realizar a transferência desses sedimentos gerados nas sub-bacias para o canal, tem-se a propagação destes para fora da bacia hidrográfica, sendo neste estudo considerada como produção de sedimentos (SED_OUT) a descarga sólida que passa pelo ponto de controle o exultório, entende-se que o fator precipitação deveria estar diretamente ligado a produção de sedimentos porém as respostas que o swat fornece no processo de simulação apresenta alguns atrasos, alguns deles em função da dimensão da bacia e outros em função das equações que este utiliza relacionado aos fatores topográficos.

Ressalta-se que foram realizadas inúmeras tentativas de calibrar a produção de sedimentos e chegou-se a valores de parâmetros calibrados que não foram satisfatório,

Analisando os resultados observa-se que em todos os anos o modelo não apresentou

respostas satisfatórias, ou seja, o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) não se aproximou do valor superior a 0,5. Para todos os anos, os resultados simulados superestimaram os valores medidos de produção de sedimentos, representados pelos COE's negativos. Melhores resultados foram obtidos nos anos de 2010 e 2013, e piores em 2002 e 2006, sendo necessário um maior tempo de estudo para podermos calibrar a produção de sedimentos, acredita-se que um dos principais motivos para não conseguir-se realizar a calibração seja o tamanho da bacia e os parâmetros internos do aplicativo que são utilizados para cálculo do aporte de sedimentos, observou-se também que nos anos utilizados para calibração de 1989 a 2001, tivemos meses em alguns anos com chuvas intensas o qual o simulador não computou um grande aporte de sedimentos e períodos de estiagem que o mesmo atribuiu um grande aporte de sedimentos.

O simulador SWAT utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada que utiliza-se de parâmetros como uso e manejo do solo, hidrológicos e topográficos, podendo estar a superestimação relacionada a qualquer um destes parâmetros, o único valor que é estimado automaticamente pelo modelo a partir do modelo de elevação do terreno utilizado fornecido pela NASA é o fator LS, comprimento e declividade de rampa.

O modelo SWAT aplica a MUSLE em cada Unidade de Resposta Hidrológica que compõe as sub-bacias. O somatório do aporte de sedimentos gerado pelas HRU's que compõem uma sub-bacia é o aporte de sedimentos total dessa sub-bacia, e temos um fator importante que afeta a produção de sedimentos que seria o fator topográfico para cada Unidade de Resposta Hidrológica (HRU), onde este considerando o comprimento de rampa a distância entre os pontos de extremos, e a declividade baseia-se na relação entre a diferença altimétrica e a distância entre esses pontos, sendo este uma maneira generalista de demonstrar o comprimento de rampa dentro das HRU, observando-se que no presente trabalho estão presentes 31 unidades de resposta hidrológica, este método simplificado de cálculo do fator LS pode explicar a superestimativa na produção de sedimentos gerada pelo SWAT, pois o fator LS utilizado pela MUSLE assume o comprimento de rampa como sendo de 22,1 m de comprimento e 9,0 % de declividade, o que não ocorre nas HRU, observando-se que no momento que se utiliza somente valores extremos de HRU, não estamos representando a real situação de campo de deposição de sedimentos nas partes intermediárias estamos tomando o ponto mais alto e o mais baixo, além de aumentando a velocidade de escoamento e conseqüentemente aumentando a produção de sedimento que chega até o canal, estes sendo um dos fatores que dificultou o processo de calibração do modelo.

De acordo com Shirivastava et al. (2003), ao simular em uma bacia no leste da Índia a produção de sedimentos encontrou discrepâncias entre os valores simulados e medidos, alegando isto a equações da rotina de cálculo da propagação no canal ser simplista ao considerar as dimensões do canal como estáticas durante a simulação, onde sabe-se que o canal sofre diversas alterações na forma, muito influenciada pelas características do relevo, tipo de solo, e ações antrópicas, sendo este um fator de suma importância para a propagação dos sedimentos.

Conforme diversos estudos mostraram, o aumento do comprimento de rampa (L) e da declividade das encostas (S) resulta em um aumento da velocidade de escoamento superficial e erosão onde o comprimento de rampa é a distância entre o ponto de origem do escoamento até um ponto onde o escoamento encontra um canal ou uma condição de deposição dos sedimentos, através disto verifica-se que o fator LS não está considerando as características geomorfológicas ao longo da rampa, não levando em consideração, pontos de deposição de sedimentos no decorrer da rampa, sejam estes de origem natural ou antrópica.

Conforme Uzeica (2009), ao aplicar o modelo de simulação SWAT, constatou-se que a existência de pontos de deposição nos pés das encostas pode ser considerada uma justificativa para o baixo desempenho do modelo SWAT nas simulações de aporte de sedimentos, em simulação realizada observou que em diversos pontos da bacia que estudou, verifica-se a deposição de grandes volumes de solo erodido nas lavouras em depressões próximas ao canal aluvial, evidenciando que nem todo o solo destacado nas encostas atinge o fluxo, podendo este ser o motivo dos valores observados de produção de sedimentos estarem tão abaixo em relação aos valores simulados, pois para a interpretação do modelo SWAT, devido à forma de obtenção do fator LS , a maior parte o aporte de sedimentos gerados pelas bacias escoam até os canais, a mesma ainda coloca que com relação aos camalhões, utilizando a resolução de células de 20x20 m para o MNT, não é possível representá-los.

Finalizando conclui-se que, no momento com a calibração realizada a simulação para sedimento não apresenta bons resultados, necessitando de novas calibrações para ser validado e utilizado como indicativo de aporte de sedimentos nesta e em bacias próximas.

5.2.2.2 Calibração para Vazão Líquida (Flow_Out)

Para calibração foram selecionados cinco anos, 1991, 1993, 1995, 1999, e 2001, seguindo o proposto na metodologia utilizarmos o Coeficiente de Eficiência (COE) para validarmos, apresentou-se COE superior ao estipulado pela bibliografia em quase todos os anos analisados com exceção de 1993, onde obtivemos 0,47, sendo este o ano que apresentou o maior volume médio de chuvas, os demais apresentaram um valor médio de 0,59, sendo estes resultados satisfatórios.

Observa-se que conforme Govender & Everson (2005), através de seus estudos constatou que o modelo SWAT apresenta melhores resultados em anos secos do que em anos úmidos, e conforme Uzeica (2009), essa diferença do modelo para anos úmidos e secos pode estar vinculado à dificuldade do modelo simular a água disponível no solo durante os períodos úmidos, onde se deve considerar a umidade do solo, pois a vazão é a resposta final do comportamento hidrológico da bacia, ou seja, quanto maior a umidade do solo, maior é o escoamento superficial e menor a infiltração, mais rápida é a passagem da água precipitada para dentro do canal de escoamento, se a taxa de infiltração for alta, a transferência da água precipitada passa a ser subterrânea e ocorre mais lentamente, sendo este um fator que pode ocasionar superestimação ou sub nos cálculos.

De acordo com Butcher (2001), 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.

Conforme outros autores, como Van Liew & Garbrecht (2003), que colocam que existe uma simplificações no equacionamento do fluxo de subsuperfície e da transmissão das perdas na fase de canal, Saleh & Du (2004) existe uma dificuldade do SWAT em prever a vazão diária à utilização do Método da Curva Número, onde a duração e a intensidade da chuva não são consideradas, somente o volume total precipitado.

Observa-se a partir dos resultados obtidos e de outros trabalhos, que em anos com maior volume de precipitação como ocorreu em 1993, o modelo subestima os resultados de vazão, o que pode ter levado a dificuldade de calibração para aquele ano, e conforme Gassman et al. (2007), este comportamento está vinculado a inadequada estimativa de algum componente do balanço hídrico, como por exemplo, a evapotranspiração, a água subterrânea e

as demais perdas. De acordo com Gassman et al. (2007), a superestimação da vazão pode estar vinculada à utilização de parâmetros padrões do modelo SWAT, principalmente os parâmetros que governam a movimentação da água nos aquíferos e aqueles que definem as rotinas entre as células drenagem.

Conclui-se que para os dados de vazão líquida a simulação com os dados calibrados demonstrou que o SWAT executou esta rotina de maneira adequada com valores simulados próximos aos reais sendo possível utilizar este para previsões de bacias próximas com mesmas características e previsão de cenários alternativos, devendo-se analisar os resultados e com uma possível necessidade de novas calibrações.

5.2.3 Discussão sobre Validação

Depois de calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado para situações semelhantes às aquelas em que se quer aplicá-lo, deve-se tomar outra série temporal de dados, diferente da utilizada na calibração, no processo de validação (ALANSI et al. 2009). Os resultados dessa etapa indicam se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração.

Conforme Srinivasan et al. (1998) este realizou a validação de componentes hidrossedimentológicas do modelo SWAT, onde foram obtidas taxas de escoamento superficial mensais próximas às observadas; porém, em alguns anos, durante a primavera e o verão, o modelo superestimou, o que não garante o ótimo desempenho do modelo mesmo este sendo validado.

O processo de validação foi realizado somente para Vazão Líquida, produção de sedimentos não conseguiu-se realizar a calibração do modelo, conseqüentemente não ocorreu validação, selecionou-se 7 anos para realizarmos a validação do modelo, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 e 2013, seguindo o proposto na metodologia utilizarmos o Coeficiente de Eficiência (COE) para validarmos.

Como resultados, obteve-se que para todos os anos com exceção de 2006 os valores simulados após calibração estão acima do estipulado pelas bibliografias de 0,50 com um valor médio de 0,61, o que indica que o modelo pode ser utilizado para prever cenários futuros. Diante desta contextualização de modelos hidrossedimentológicos, percebe-se que a simulação de diferentes cenários futuros de forma rápida e de baixo custo, é uma alternativa válida após

a validação. Pode-se dizer que a modelagem é a uma forma prática, rápida e barata de se simular cenários futuros dos recursos naturais, possibilitando a proposição de soluções para contornar alguma situação indesejada, ou seja, realizamos um diagnóstico para gerarmos um prognóstico, o que denominamos de gestão ambiental.

CONCLUSÃO

A aplicação do modelo SWAT na bacia Guaporé apresentou bom ajuste para os dados de vazão e não para os de sedimento. Com a calibração manual foi atingindo um *NASH* de 0,57 para calibração e 0,68 para validação de vazão e -8,89 para calibração de sedimentos.

Este trabalho também procurou preencher uma lacuna existente na bibliografia atual sobre o assunto, referente ao tipo de resolução espacial que seria mais adequada gerando simulações mais precisas, onde se analisou como as resoluções influenciaram no processo de simulação com modelos não calibrados, onde se demonstrou que a resolução de 200 metros apresentou os melhores resultados, sendo esta um indicativo para trabalhos futuros, pois, existe uma falta de informações que indique qual seria o produto resolução espacial mais adequado para realizarmos as simulações, e observou-se que o melhor nível de detalhamento não promoveu resultados melhores, desta maneira as imagens de alta resolução espacial não seriam as mais indicadas para rodar as simulações, porém, seria as mais indicadas para realizarmos o processo de classificação de imagens, observando-se que quando trabalhamos com grandes bacias existe a necessidade de utilizarmos um algoritmo de classificação, onde na presente tese o Maxver 95 apresentou melhores resultados pois a classificação manual seria extremamente demorada e de difícil realização.

A resolução de 200 metros também apresentou bons resultados, conforme observamos em função das equações generalistas utilizadas pelo SWAT, onde o recomendável seria que se criasse uma alteração na equação de perdas de solo no fator topográfico, conforme a formulação proposta por Foster e Wischmeier (1974).

A discretização espacial do fator LS é um dos maiores desafios para a modelagem matemática da erosão, principalmente tendo em vista a grande complexidade do relevo em uma bacia hidrográfica onde temos pontos de deposição ao longo da rampa de declividade antes de atingir o canal, por isto também a necessidade de mais estudos abordando a variação da resolução espacial, a representatividade dos pixels no fator comprimento de rampa, no momento que se desenvolva uma equação que consiga absorver um maior nível de detalhamento por parte do pixel obteremos valores mais condizentes com a realidade tanto para vazão como para o aporte de sedimentos, existe todo um avanço tecnológico em relação a captura de informação por sensoriamento remoto e as equações utilizadas para simular trabalham com parâmetros matemáticos retróados.

Quanto à tabulação de dados, sabe-se da dificuldade de obtermos dados no Brasil climáticos e de solos, para os dados climáticos necessitou-se trabalharmos com varias estações para representar espacialmente a área da bacia, onde várias estações apresentavam séries de falhas de coleta que tiveram que ser preenchidas pelo simulador climático, já para os solos são inúmeros parâmetros a serem preenchidos, que para termos uma situação ideal deveriam ser coletados a campo, então se observarmos a realidade do uso de modelos de simulação no Brasil nos deparamos com a dificuldade de obtermos dados precisos e em quantidade, estamos com um déficit quali quantitativo.

Observa-se também que um dos fatores que levou a dificuldade de simulação do aporte de sedimentos e a conseqüente não calibração do modelo, foi o fato de termos trabalhado o perfil dos solos de forma homogênea sem a discriminação das alterações que ocorrem, isto diretamente relacionado à falta de dados consistentes sobre os solos estudados na região.

As imagens de satélite que foram utilizadas para gerar o mapa de uso e ocupação do solo que são de vital importância na simulação como foi comentado na metodologia foram obtidas gratuitamente no servidor do Google, porém a metodologia aplicada para tornar as mesmas aptas a serem utilizadas no processo de simulação foi bastante trabalhosa e demonstraram-se poucas vantagens visto que a melhor resolução na simulação se obteve com 200 metros, ou seja, para trabalharmos com toda a informação que uma imagem de alta resolução fornece como colocado anteriormente necessita-se que as equações sejam alteradas para adaptar-se a esta nova realidade.

Existe em conjunto a problemática relacionado ao tamanho da bacia, 2020 Km², mesmo o SWAT sendo um simulador projetado para trabalhar com grandes bacias, quando temos tantas incertezas e erros conceituais de fórmulas e parâmetros utilizados este vai gerar erros na saída ou seja no produto final, porém mesmo levando-se em consideração todos estes fatores contra o modelo de simulação SWAT este após calibrado conseguiu gerar valores de vazão próximo dos medidos, o que é um indicativo da boa funcionalidade do sistema se levarmos em consideração o contexto geral, ou seja onde um parâmetro falha o outro compensa. Quanto ao aporte de sedimentos, um maior tempo realizando o processo de calibração deve trazer bons resultados, ou seja vai-se continuar realizando o processo de calibração com os parâmetros que a análise de sensibilidade indicou como mais sensíveis até obtermos a calibração do modelo para produção de sedimentos. Após a calibração existe a possibilidade de gerarmos cenários alternativos que não foi desenvolvida na presente tese,

mas que é de suma importância quando pensamos em políticas públicas direcionada a conservação de nossos recursos.

Concluindo-se o modelo SWAT apresentou um bom desempenho ao simular os parâmetros hidrológicos de vazão líquida e insatisfatórios para os parâmetros sedimentológicos, aporte de sedimentos, havendo superestimação da produção de sedimentos em todas as simulações onde não se conseguiu realizar a calibração.

Assim, apesar de nem todos os resultados encontrados serem favoráveis, o estudo é de grande avalia, pois apontou características do modelo SWAT que devem ser levadas em consideração principalmente relacionadas a resolução espacial das imagens podendo servir de embasamento para outras simulações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O simulador hidrosedimentológico SWAT foi desenvolvido nos Estados Unidos com a finalidade de auxiliar este país na gestão do uso e do manejo adequado das áreas rurais com o objetivo de minimizar os impactos ambientais causados pela agricultura e ação antrópica

O monitoramento de dados climatológicos e hidrosedimentológicos é deficitário e apresenta grandes falhas, principalmente no Brasil tornando difícil a utilização de modelos capazes de simular a produção de sedimentos e vazões, porém o SWAT, é um modelo conceitual que foi desenvolvido para prever o impacto do uso e manejo do solo na produção em bacias agrícolas não instrumentadas ARNOLD et al. (1998).

Devem-se ter alguns cuidados na aplicação de simulações em modelos hidrosedimentométricos propondo-se algumas recomendações em função de limitações e dificuldades detectadas no presente trabalho, como:

Necessidade de um período de aquecimento do modelo, pois as simulações iniciais apresentam valores superestimados, havendo um ajuste dos resultados com o decorrer do tempo de simulação, recomenda-se inserir períodos de dados de precipitação anteriormente ao ano que se deseja iniciar a simulação, explica-se pelas condições iniciais do modelo que, por padrão, considera uma saturação completa do solo. Após cerca de seis meses não são mais observados desvios sistemáticos entre os valores simulados e observados ZEILHOFER et al. (2002).

Cuidados na distribuição espacial das precipitações, ou seja, obtenção de dados de estações meteorológicas bem distribuídas, e obtenção de séries mais longas de dados.

Cuidados na calibração, o processo automatizado para análise de sensibilidade e calibração necessita menos esforço humano, mas pode induzir a erros que seriam evitados com a identificação mais precisa dos processos que devem ser realizados na calibração e dos parâmetros mais significativos para representação dos processos envolvidos.

Quando existe uma grande heterogeneidade espacial em relação ao uso e ocupação e quando a bacia em estudo é muito grande como foi o exemplo da Bacia Guaporé, o modelo não possui sensibilidade de reconhecer pequenas áreas em meio de áreas maiores, não é indicado a utilização do mesmo em bacias hidrográficas com propriedades de pequeno porte em meio a outras de grande porte, sendo o aconselhável rodar este em partes.

Uma análise para substituição da equação do fator topográfico está normalmente realiza uma superestimação dos resultados na produção de sedimentos conforme já se colocou, o fator LS possui grandes limitações ao ser aplicado em escala de bacia hidrográfica. A forma de determinação do fator LS não considera as variações geomorfológicas da bacia; dessa maneira, não identifica pontos deposicionais, principalmente nos pés das encostas.

Equacionamento da propagação dos sedimentos no canal aluvial que é muito simples, não considerando, a variação granulométrica dos sedimentos transportados e as alterações dinâmicas que ocorrem na calha do canal.

Observar a dificuldade do modelo em interpretar eventos extremos de precipitação, em grandes volumes durante um curto intervalo de tempo. O modelo interpreta como uma condição onde a taxa de precipitação seja superior à taxa de infiltração, resultando em simulações onde o escoamento superficial é superestimado.

Cuidados com os parâmetros utilizados para compor o banco de dados de solos, uso de parâmetros não condizentes com a realidade faz com que a real condição física dos solos da bacia não esteja devidamente representada, gerando em erros de estimativas, podendo influenciar na vazão do canal. Coleta e análise de dados pedológicos de forma mais abrangente, procurando representar uma maior quantidade de combinações de uso do solo, tipo de solo e classe de rampa.

Realizar a calibração e validação por sub-bacias resultando em um melhor ajuste, e resultados simulados, demonstrando de forma mais precisa o escoamento e as taxas de infiltração, permitindo assim uma simulação mais confiável

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development.** JAWRA, v. 34, n. 1, p. 73-89. 1998.

ARNOLD, J. G. et al. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin.** Journal of Hydrology, v. 227, p. 21-40, 2000.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá, MT.** Dissertação de Mestrado em Física do Meio Ambiente Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá. 132 pp. 2005.

BENITES, E.T.MOTA, J. L. O; REYNOSO, D. S. F. **Aplicación del modelo SWAT en la cuenca “el tejocote”, Atlacomulco, estado de México.** X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 4: Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Chihuahua, México. 2000.

BARSANTI, P.; DISPERATI, L.; MARRI, P.; MIONE, A. **Soil erosion evaluation and multi-temporal analysis in two brazilian basins.** 2nd International SWAT Conference. TWRI Technical Report 266. Baria/Italy. 2003.

BEVEN, K.J. **Rainfall – Runoff Modelling:** the primer. John Wilwey & Sons Ltda. Chichester, England, 2001.

CAMARA, Gilberto. **Introdução a Ciência de Geoinformação.** São José dos Campos: INPE, 345p. 2001.

CHAPLOT, V. **Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions.** Journal of Hydrology, v. 312, p. 207-222. 2005.

CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data,** Chichester, John Wiley. 1993.

CORREA, R.L. **O espaço urbano.** São Paulo: Ática. 1989.

DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L. Interpolação pluviométrica na Bacia do Alto e Médio Rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In: **Simpósio Brasileiro De Ciências Geodésicas E Tecnologias Da Geoinformação**, 3., 2010, Recife. Anais... Recife: UFPE. p.1-7. 2010.

ESRI. **Using ArcGIS Geostatistical Analyst**. Redlands, CA: ESRI Press, 2001.

FAZAL, Shahab. **Gis Basics**. New Age International, 350p. 2008.

MACKAY, D. S. **Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model**. Journal of Hydrology, v. 236. p. 35-53. 2000.

GREGORY, Ian N., ELL, Paul S. **Historical GIS: Technologies, Methodologies and Scholarship**. Cambridge University Express, 241 p. 2007.

GALLARDO, A. **Geostatística. Ecosistemas**, Mósteles, v. 15, n. 3, p. 1-11, 2006.

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

JIMENEZ, K. Q.; DOMEQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.16, 2008.

JHA, M., GASSMAN, P. W., SECCHI, S., GU, R. e ARNOLD, J. **Impact of Watershed Subdivision Level on Flows, Sediment Loads, and Nutrient Losses Predicted by SWAT**. Working Paper 02-WP 315. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. 27 pp. 2002.

JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. **Center for Agricultural and Rural Development (CARD)**. Publications 09-wp492. Iowa State University. 24 pp. 2009.

KNIGHTON, D. **Fluvial forms and processes: a new perspective**. London: Arnold. 383 p. 1998.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP. 2. ed. Rev. E ampl. 253 p. 2003.

LANE, L.J.; HERNANDEZ, M.; NICHOLS, M. **Processes controlling sediment yield from watersheds as functions of spacial scale.** *Environmental Modelling & Software*, Oxford, v. 12, n. 4, p. 355-369. 1997.

LAL, R. **Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality.** *CRC Critical Reviews in Plant Science*, Boca Raton, v. 17, p. 319-464. 1998.

LIBOS, M.I.P.C. **Modelagem da poluição não pontual na Bacia do Rio Cuiabá baseada em geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro/RJ. 269 p. 2002.

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

MACHADO, R. E; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a micro bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Rev. Bras. Ciênc. Solo.** vol.27, n.4. Viçosa. Julho/Agosto. 2003.

MATEUS, R.S. **Modelo hidrológico da bacia hidrográfica da represa Guarapiranga – São Paulo, SP.** Dissertação mestrado em Geografia Física, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Programa de pós-graduação em Geografia física. Universidade de São Paulo, 154p. 2006.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas. II: Diversidade de processos na bacia vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 81-100, 1997.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 30, p. 1387-1396, 1987.

MINELLA, J.P.G. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural.** 80 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

MITASOVA, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **Journal of Geographical Information Science** 10 (5). 629–641. 1996.

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.** Dissertação de Mestrado em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 100 pp. 2005.

MULETA, M. K. e NICKLOW, J. W. **Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model.** Journal of Hydrology 306. p. 127–145. 2005.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment User’s Manual. Version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service e Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station.** 412 pp. 2002.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 217-225, 2010.

OLIVEIRA, S.M. **Análise do processo chuva-vazão de duas bacias hidrográficas na região litorânea do estado do Paraná, através de modelo de tanque.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná. 1999.

PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI, A.J.; FERNANDES, E.N. and LIMA, M.A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas.** Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA, 83p. 1997.

PINTO, N. de S; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica.** São Paulo. Edgard Blücher, 1976.

RANZINI, M. et al. **Modelagem Hidrológica de uma Microbacia Florestada da Serra do Mar, SP.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Porto Alegre, vol.9, n. 4, p. 33-44, out./dez. 2004.

RAUDI KIVI, A. J. **Loose Boundary Hydraulics.** Pergamon International. 2ª Edição. 397pp. 1976.

REIS, M. H.; GRIEBELER, N. P.; SARMENTO, P. H. L.; OLIVEIRA, L. F. C. de.; OLIVEIRA, J. M. de. Espacialização de dados de precipitação e avaliação de interpoladores para projetos de drenagem agrícola no estado de Goiás e Distrito Federal. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 12. Goiânia. Anais..., Goiânia: INPE, 2005. p. 229-236. 2005.

RENNO, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil. 146 pp. 2004.

REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. Projeto Madeira do Rio Grande do Sul. *Sellowia*, Itajaí, v. 34/35, n. 34/35, p. 5-483. **Anais Botânicos do Herbário Barbosa Rodrigues**. 1983.

SANTOS, R.C. **Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SILVA, K. R.; PAIVA, Y. G.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim-ES. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 13., 2007, Florianópolis. *Anais...*, Florianópolis: INPE, 2007. p. 3141-3146. 2007.

SCHIETTECATTES et OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 217-225, 2010.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto do Rio Grande, MG**. Tese de Doutorado. UFLA. 155 pp. 2006 b.

SINGH, V.P. **Computer models of watershed hydrology**. Water resources publications, Colorado, use, – cap. 1 pg. 01 – 22. 1995.

SRINIVASAN, R. and ARNOLD, J.G. **Integration of the basin-scale water quality model with GIS**. *Water Resources Bulletin*, v.30, n.03, p. 453-462, 1994.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed.Universidade:UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 943 pp. 1998.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS, Cap. 1, p. 13-22. 2002.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.** Tese de Mestrado. UFRS. 129 pp. 2009.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul.** São José dos Campos, SP. INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 2004.

VAN GRIENSVEN, A. V. 2009. **Sensitivity, autocalibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005.** Artigo técnico. Disponível em: <http://gisvrc.vrac.iastate.edu/icrw/download/PrintOut/SWAT2005_manual_sens_cal_unc.pdf>. Acesso em: 10 abril.

WALLING, D.E. **Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land.** In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I.D.L.; DEARING, J.A. (Ed.). Soil erosion on agricultural land. Chichester: John Wiley. p. 129-152. 1990.

WALLING, D. E. **Measuring sediment yield from river basins.** In: LAL, R. (Ed.). Soil erosion research methods. Ankeny: Soil and Water Conservation Society. p. 39-74. 1988.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 801-814, 2008.

WOODCOCK, C.E., Strahler, A.H. **The factor of scale in remote sensing.** Remote sensing of environment 21 (3). 311– 322. 1987.

XAVIER, F. V. **Contribuição metodológica ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso, utilizando o modelo AVSWAT.** UFMT. Dissertação de Mestrado. 166 pp. 2009.

XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.8, p.871–880, 2010.

ZEILHOFER, P.; “Aplicabilidade de Mapas Topográficos 1:100.000 para a Modelação de Relevo e Obtenção de Parâmetros Fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol.6, n.3. 2001.

