

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO ATRAVÉS DA  
SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA REPRESENTATIVA  
DE SUMÉ COM O MODELO SWAT**

Dissertação de Mestrado

**ITAMARA MARY LEITE DE MENEZES TAVEIRA**

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2012

**ITAMARA MARY LEITE DE MENEZES TAVEIRA**

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO ATRAVÉS DA  
SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA REPRESENTATIVA  
DE SUMÉ COM O MODELO SWAT**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS**

**ORIENTADOR:** Prof. PhD. Vajapeyam S. Srinivasan

**COORIENTADOR:** Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

T232a Taveira, Itamara Mary Leite de Menezes.  
Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação hidrosedimentológica da bacia representativa de Sumé com o modelo SWAT / Itamara Mary Leite de Menezes Taveira. - Campina Grande, 2012.  
153 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. PhD. Vajapeyam S. Srinivasan e Co-orientador: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão.

Referências.

1. Semiárido. 2. Práticas Conservacionistas. 3. SWAT. I. Título.

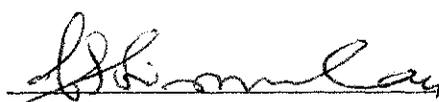
CDU 556.51(043)

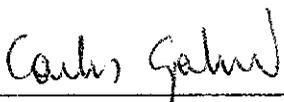
ITAMARA MARY LEITE DE MENEZES TAVEIRA

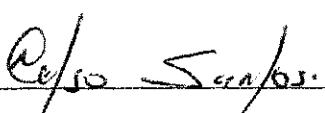
AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO ATRAVÉS DA  
SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA REPRESENTATIVA DE  
SUMÉ COM O MODELO SWAT

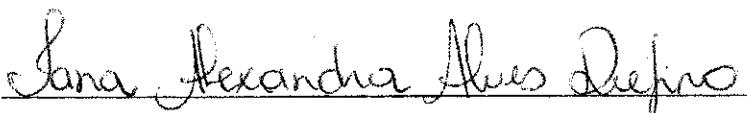
APROVADA EM 29/02/2012

PELA SEGUINTE COMISSÃO EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. PhD. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN  
PRESIDENTE – ORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO  
COORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS  
EXAMINADOR EXTERNO (UFPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Drª. IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO  
EXAMINADORA INTERNA

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2012

DEDICATÓRIA

---

*A Itamar e Mércia, meus amados pais,*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

---

Primeiramente a Deus, por ter concedido esta vitória em minha vida, dando-me força para prosseguir mesmo nos momentos que pensei em desistir ou fraquejar. Obrigada por sua infinita misericórdia!

Aos meus pais Manoel Itamar Taveira e Mércia Maria Leite de Menezes Taveira por tudo que fizeram e fazem por mim com amor incondicional.

Aos meus irmãos Ítalo, Mercilya, Igor e Ivson pelo companheirismo e por me mostrarem todos os dias o verdadeiro sentido da palavra família.

A Adenes S. Souto, um presente de Deus em minha vida, pela paciência, compreensão, incentivo e carinho, sem os quais eu não conseguiria ter chegado até aqui. Amo muito você.

Aos meus tios, tias, primos e primas agradeço as orações e confiança depositadas em mim.

Ao meu orientador, o professor Vajapeyam S. Srinivasan, que desde a graduação com muita paciência transmitiu-me os seus conhecimentos, e tornou-se para mim um exemplo de profissional e pessoa.

Ao meu coorientador, o professor Carlos de Oliveira Galvão, agradeço a oportunidade, confiança e por todas as conversas que muito contribuíram no meu crescimento profissional.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da área de Engenharia Hidráulica da UFCG: Carlos de O. Galvão, Eduardo E. Figueiredo, Zédna M. C. L. Vieira, Camilo Allyson S. de Farias, Iana Alexandra A. Rufino, Annemarie König e Wilson Fadlo Curi pelos ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos meus colegas de mestrado John Elton de B. L. Cunha, Ester L. Araújo, Camila Macedo, Antônio Leomar F. Soares, Renato Santiago Costa e Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro, a esta um agradecimento especial, muito mais que uma amiga, uma irmã de coração, obrigada por sua preciosa amizade desde a graduação.

A todos que fazem o Laboratório de Hidráulica II agradeço o companheirismo e os inúmeros momentos de descontração durante o cafezinho, em especial a Simone Danielle Aciole Moraes e Mayara Jardim de Medeiros Silva, pela grande ajuda na conclusão desta dissertação.

Aos funcionários dos Laboratórios de Hidráulica I e II da UFCG: Aurezinha, Haroldo, Ismael, Lindimar, Raulino, Ronaldo, Valdomiro e Vera pela atenção e disponibilidade.

À Dr<sup>a</sup>. Nancy Sammons pela colaboração na solução das dúvidas na aplicação do modelo.

A John Cunha, Douglas Almeida e Samilly Jaciara agradeço toda a ajuda e disponibilidade, principalmente nas dúvidas relativas ao geoprocessamento. Sinto-me privilegiada em ter amigos como vocês.

Aos professores examinadores Celso Augusto Guimarães Santos e Iana Alexandra Alves Rufino pelas contribuições para a melhoria deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro concedido.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram na conclusão deste trabalho e reparto a alegria de vencer mais esta etapa em minha vida!

*Muito Obrigada!*

**RESUMO**

---

O semiárido brasileiro é um dos maiores e mais populosos do mundo, marcado pela escassez e variabilidade espacial e temporal das chuvas. Aliado a estas características climáticas, a ocupação antrópica tem provocado, através do desmatamento da vegetação nativa e manejo inadequado do solo, um processo de degradação que compromete o equilíbrio ambiental das bacias hidrográficas destas regiões. A destruição da caatinga, vegetação predominante no semiárido nordestino, tem contribuído para acelerar a erosão do solo, cujas consequências se refletem em prejuízos sociais, ambientais e econômicos. O processo erosivo pode ser minimizado com o uso integrado de práticas de conservação do uso do solo, que levem em consideração o conjunto de seus principais atributos físicos, ecológicos e econômicos. Neste trabalho a necessidade de planejar adequadamente o aproveitamento dos recursos de solo na região semiárida do Brasil, impeliu a utilização do modelo *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT na Bacia Representativa de Sumé (BRS), localizada na parte superior da bacia do Rio Paraíba – PB, como ferramenta de simulação dos processos hidrossedimentológicos para fins de planejamento conservacionista do uso do solo desta bacia. O desempenho do modelo nos processos de parametrização e verificação da consistência foi analisado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE). A simulação de cenários permitiu avaliar quanto as alterações no uso e ocupação do solo interferem nos processos de escoamento superficial e produção de sedimentos e propor a simulação de um cenário alternativo de uso da bacia caracterizado por uma prática conservacionista de caráter vegetativo: o reflorestamento. Os resultados obtidos mostraram que o cenário representando toda a bacia preservada é a condição ideal do ponto de vista hidrológico, porém como a bacia já possui áreas com intervenções antrópicas bastante acentuadas, a proposta de reflorestamento, é uma alternativa plausível no planejamento conservacionista da Bacia Representativa de Sumé. Por fim, os resultados obtidos neste trabalho podem servir de base para análise de manejos alternativos, visando a redução do impacto das atividades antrópicas em bacias hidrográficas e dando suporte ao planejamento do uso e manejo da bacia em bases conservacionistas.

**Palavras Chave:** Semiárido, práticas conservacionistas, *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT

**ABSTRACT**

---

The Brazilian semiarid area is one of the largest and most populous regions in the world, marked by scarcity, spatial and temporal variability of rainfall. Together with these climate characteristics, human settlement has triggered, through the deforestation of native vegetation and unsuitable soil handling, a process of degradation that compromises the environmental balance of the basins in these regions. The destruction of the caatinga, predominant vegetation in the Brazilian semiarid area, has led to the acceleration of soil erosion, whose features reflect social, environmental and economical damage. The erosion can be minimized with the integrated use of conservation practices of land use that take into account its entire main physical attributes, ecological and economical representation. In this work, the need for adequately planning the use of the soil resources in the Brazil's semiarid, has impelled the adoption of the Soil and Water Assessment Tool – SWAT in the Representative Basin of Sumé (RBS), located in the superior part of the Paraíba River basin– PB, as a tool for simulation of the runoff-erosion process for conservational planning of the use of soil in this basin. The model performance in the processes of parameterization and verification of consistency was analyzed through the coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash-Sutcliffe's coefficient of efficiency (NCE). The sceneries' simulation allowed us to evaluate how much the alterations of soil use and settlement interfere in the processes of superficial runoff and sediment yield, and proposed a simulation in the alternative scenery of the basin use featured as a conservational practice of vegetative desirability: reforestation. The obtained results show that the scenery which represents the whole preserved basin is the ideal condition in hydrological aspects, however, as the basin has areas with strong man's interventions, the proposal for reforestation is a plausible alternative in the conservational planning of the Representative Basin of Sumé. Finally, the results obtained in this paper can be the basis for the analysis of alternative handling, aiming at the reduction of the impacts of man's activities in the watershed and supporting the planning of the use and management of basins in conservational bases.

**Keywords:** Semiarid area, conservational practices, Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

## SUMÁRIO

---

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	16
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	19
2.1 Processos hidrológicos em bacias hidrográficas .....	19
2.2 Processos hidrossedimentológicos .....	21
2.2.1 <i>Erosão hídrica</i> .....	22
2.2.2 <i>Influência da cobertura vegetal</i> .....	24
2.2.3 <i>Os problemas relacionados com os sedimentos</i> .....	26
2.3 Planejamento conservacionista de bacias hidrográficas.....	27
2.4 Modelos Hidrológicos .....	30
2.5 Integração entre SIG e modelos hidrológicos.....	34
CAPÍTULO 3 – O MODELO SWAT .....	38
3.1 Descrição geral do modelo .....	38
3.2 Descrição das equações do modelo .....	41
3.2.1 <i>Fase do sedimento no ciclo hidrológico</i> .....	41
3.2.2 <i>Fase da água no ciclo hidrológico</i> .....	53
3.3 Aplicações do modelo SWAT .....	56
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
4.1 Área de estudo .....	61
4.1.1 <i>Breve histórico</i> .....	61

4.1.2	<i>Localização</i> .....	62
4.1.3	<i>Características Físico-Climáticas</i> .....	64
4.2	Descrição dos dados de entrada do modelo.....	68
4.2.1	<i>Modelo Digital de Elevação</i> .....	68
4.2.2	<i>Uso e ocupação do solo</i> .....	69
4.2.3	<i>Pedologia</i> .....	70
4.2.4	<i>Dados Climatológicos</i> .....	74
4.3	Processo de funcionamento do modelo .....	77
4.3.1	<i>Delimitação e discretização da bacia</i> .....	78
4.3.2	<i>Unidades de Resposta Hidrológica</i> .....	78
4.3.3	<i>Período de aquecimento do modelo</i> .....	79
4.4	Parametrização do modelo.....	79
4.4.1	<i>O processo de parametrização</i> .....	79
4.4.2	<i>Parâmetros adotados</i> .....	80
4.4.3	<i>Parâmetros calibrados</i> .....	81
4.4.4	<i>Índices de ajuste</i> .....	82
4.5	Verificação da consistência do modelo .....	82
4.6	Simulação de cenários .....	83
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		87
5.1	Delimitação e discretização das bacias.....	87
5.2	Unidades de Resposta Hidrológica.....	88
5.3	Parametrização do SWAT para a BRS.....	90
5.4	Verificação da consistência .....	99
5.5	Simulação de cenários .....	106
5.5.1	<i>Cenário 1</i> .....	106
5.5.2	<i>Cenário 2</i> .....	113
5.5.3	<i>Cenário 3</i> .....	117

5.5.4	<i>Cenário 4</i> .....	120
5.5.5	<i>Cenário 5</i> .....	122
5.5.6	<i>Síntese dos Cenários</i> .....	128
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....		132
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		134
ANEXO.....		145

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Critérios de classificação para integração entre modelos e SIG (Fonte: Melo, 2010) .....	36
Tabela 4.1 - Classificação antiga e nova para os solos existentes na BRS .....	66
Tabela 4.2 - Parâmetros do solo distintos para cada camada .....	72
Tabela 4.3 - Classificação Textural e capacidade de água disponível no solo (Fonte: Salter e Williams , 1967 e 1969 apud Baldissera, 2005).....	74
Tabela 4.4 - Localização das estações.....	75
Tabela 4.5 - Dados climáticos mensais .....	76
Tabela 4.6 - Precipitação e lâmina escoada nas bacias da BRS .....	76
Tabela 5.1 – Características morfométricas da BRS.....	88
Tabela 5.2 - Composição das HRUs da BRS .....	89
Tabela 5.3- Composição das HRUs das sub-bacias .....	89
Tabela 5.4 – Desempenho do modelo para o período de 1976 a 1979 .....	91
Tabela 5.5 - Resumo das médias mensais para a BRS no período de 1976 a 1979 .....	93
Tabela 5.6 - Resumo das médias anuais para a BRS no período de 1976 a 1979.....	93
Tabela 5.7 - Desempenho do modelo para a sub-bacia de Umburana .....	99
Tabela 5.8 - Desempenho do modelo para a sub-bacia de Jatobá.....	99
Tabela 5.9 - Escoamento superficial observado e simulado e produção de sedimentos simulada por Lopes (2003) e calculadas pelo SWAT.....	104
Tabela 5.10 - Resumo das médias mensais para a sub-bacia Umburana no período de 1976 a 1979 .....	105
Tabela 5.11 - Resumo das médias mensais para a sub-bacia Jatobá no período de 1976 a 1979.....	105
Tabela 5.12 - Resumo das médias anuais para as sub-bacias Umburana e Jatobá no período de 1976 a 1979 .....	106
Tabela 5.13 - Resumo das médias mensais para o Cenário 1 .....	113
Tabela 5.14 - Resumo das médias anuais para o Cenário 1 .....	113
Tabela 5.15 - Resumo das médias mensais para o Cenário 2 .....	117
Tabela 5.16 - Resumo das médias anuais para o Cenário 2 .....	117
Tabela 5.17 - Resumo das médias mensais para o Cenário 3 no período de 1985 a 1991 .....	120

Tabela 5.18 - Resumo das médias anuais para o Cenário 3 .....	120
Tabela 5.19- Resumo das médias mensais para o Cenário 4 no período de 1985 a 1991 .....	122
Tabela 5.20 - Resumo das médias anuais para o Cenário 4 .....	122
Tabela 5.21- Resumo das médias mensais para o Cenário 5 no período de 1985 a 1991 .....	128
Tabela 5.22 - Resumo das médias anuais para o Cenário 5 .....	128
Tabela 5.23 - Resumo das médias anuais de escoamento superficial, aporte e produção de sedimentos para todos os cenários.....	130

### **LISTA DE TABELAS DO ANEXO**

Tabela A.1 – Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a BRS no período de 1976 a 1979.....	145
Tabela A.2- Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979 .....	146
Tabela A.3 - Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a sub-bacia de Jatobá no período de 1976 a 1979 .....	147
Tabela A.4 – Escoamento superficial e porte de sedimentos nos Cenários 1 e 5 por sub-bacia no mês de fevereiro de 1988.....	149
Tabela A. 5 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 1.....	156
Tabela A.6 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 2.....	156
Tabela A.7 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 3,.....	157
Tabela A.8 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 4.....	157
Tabela A.9 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 5.....	158

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 - Ciclo hidrológico (Fonte: <i>Federal Interagency Stream Restoration Working Group</i> , 1998) .....	20
Figura 2.2 - Problemas gerados pelos sedimentos (Adaptado de Carvalho, 2008).....	27
Figura 2.3 – Tipos de Práticas Conservacionistas.....	29
Figura 3.1 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adaptado de King et al., 1996 apud Machado, 2002).....	40
Figura 4.1 - Localização da Bacia Representativa de Sumé no Estado da Paraíba.....	63
Figura 4.2 - Rede de drenagem e localização das sub-bacias e postos pluviométricos da BRS .....	63
Figura 4.3 - Mapa de relevo da Bacia Representativa de Sumé.....	65
Figura 4.4- Mapa da distribuição das declividades na BRS.....	65
Figura 4.5 - Mapa pedológico da Bacia Representativa de Sumé (Fonte:Adaptado de Cadier e Freitas, 1982) .....	67
Figura 4.6 - Dados de entrada no modelo SWAT.....	68
Figura 4.7 - Mapa de uso e ocupação do solo da BRS.....	70
Figura 4.8 - Triângulo de classificação textural do solo (Fonte: Brady, 1989).....	73
Figura 4.9 - Processo de funcionamento do modelo SWAT.....	77
Figura 4.10 – Alternativas para definição das HRUs.....	78
Figura 4.11 - Mapa de uso e cobertura do solo da BRS para o Cenário 5. ....	84
Figura 5.1 – Discretização da Bacia Representativa de Sumé .....	87
Figura 5.2 - Discretização das sub-bacias (a) Jatobá e (b) Umburana .....	88
Figura 5.3 – Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a BRS no período de 1976 a 1979.....	91
Figura 5.4 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977..	95
Figura 5.5 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979..	96
Figura 5.6 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977	97
Figura 5.7 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979	98
Figura 5.8 - Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para a sub-bacia de Umburana.....	100
Figura 5.9 - Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para a sub-bacia de Jatobá.....	101

Figura 5.10 - Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979 .....	101
Figura 5.11 - Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979 .....	102
Figura 5.12- Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para os eventos diários .....	104
Figura 5.13 - Escoamento superficial nos meses de (a) Fevereiro e (b) Abril de 1986	108
Figura 5.14 - Escoamento superficial n os meses de: (a) Fevereiro e (b) Março de 1988 .....	109
Figura 5.15 - Aporte de sedimentos nos meses de (a) Fevereiro e (b) Abril de 1986...	110
Figura 5.16 - Aporte de sedimentos nos meses de (a) Fevereiro e (b) Março de 1988.	111
Figura 5.17 - Deposição de sedimentos nos canais da BRS nos meses de (a) Fevereiro (b) Abril de 1988 .....	112
Figura 5.18 - Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário 2 .....	115
Figura 5.19 - Variação do escoamento superficial entre os Cenários 1 e 2. ....	116
Figura 5.20 - Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário .....	119
Figura 5.21 Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário 4 .....	121
Figura 5.22 - Escoamento superficial para o cenário 5 no ano de 1986 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Abril.....	124
Figura 5.23 - Escoamento superficial para o cenário 5 no ano de 1988 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Março.....	125
Figura 5.24 - Aporte de sedimentos para o cenário 5 ano de 1986 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Abril.....	126
Figura 5.25 - Aporte de sedimentos para o cenário 5 no ano de 1988 nos meses de: a) Fevereiro e b) Março .....	127
Figura 5.26 – Escoamento superficial médio mensal para os cenários.....	131
Figura 5.27 - Aporte de sedimentos médio mensal para os cenários .....	131

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

---

O semiárido brasileiro é um dos maiores e mais populosos do mundo. Segundo Cirilo et al., (2007) ele se estende por uma área que abrange a maior parte de todos os Estados da Região Nordeste (86,46%), a região setentrional do Estado de Minas Gerais (11,01%) e o norte do Espírito Santo (2,51%), ocupando uma área total de 974752 km<sup>2</sup>.

A marca precípua do semiárido nordestino são a escassez e alta variabilidade espacial e temporal das chuvas. Segundo Lima e Rodrigues (2005) a cobertura vegetal, embora de predominância xerófila, é extremamente diversificada, identificando-se a formação predominante conhecida como Caatinga.

As características do meio ambiente condicionam fortemente a sociedade regional a sobreviver principalmente de atividades econômicas ligadas basicamente à agricultura e à pecuária (SUDENE). Esta ocupação antrópica tem provocado, através do uso insustentável de seus recursos naturais, um processo de degradação dos solos, dos recursos hídricos e da vegetação desta região, acelerando os processos erosivos e consequentemente a desertificação de áreas susceptíveis a este fenômeno.

As bacias hidrográficas nordestinas, principalmente aquelas situadas na porção semiárida, têm sido degradadas ao longo de décadas devido à extensiva atividade antrópica como a retirada da vegetação nativa e o uso irracional do solo para agricultura e pecuária (Aragão et al., 2002). Como relatam Albuquerque et al (2001) o desmatamento indiscriminado da vegetação nativa para a agricultura e às queimadas sucessivas com manejo inadequado do solo tem contribuído, juntamente com as secas prolongadas, para comprometer o frágil equilíbrio do meio ambiente destas regiões.

A erosão dos solos tem causas relacionadas à própria natureza, como a quantidade e distribuição das chuvas, a declividade, o comprimento e a forma das encostas, o tipo de cobertura vegetal e também a ação do homem, como o uso e o manejo da terra que na maioria das vezes, tende a acelerar os processos erosivos (Guerra e Mendonça, 2004).

O processo erosivo pode ser minimizado com o uso integrado de práticas em que o ambiente é considerado como um todo. Desta forma, para que a exploração agrícola possa ser conduzida em bases conservacionistas, torna-se necessário um planejamento

racional; levando em consideração o conjunto de seus principais atributos físicos, ecológicos e econômicos (Pruski, 2009).

“As práticas conservacionistas de caráter vegetativo se valem da própria vegetação para defender o solo contra a erosão” (Bertoni e Lombardi Neto, 2005), baseando-se, portanto, na busca de manutenção da superfície do solo coberta (Pruski, 2009). A cobertura vegetal é um fator condicionante do processo erosivo. Hudson (1995) relata que a cobertura vegetal funciona como uma capa protetora para o solo e a sua presença é o fator chave na redução da erosão hídrica.

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de impactos ambientais causados pelas atividades humanas tem movido um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam simular as transformações ocorridas através das mudanças no uso da água e do solo, levando em consideração a questão da distribuição espacial dentro da bacia em estudo (Santos et al., 2005).

A necessidade de estudos hidrológicos de longo prazo em ambientes específicos, como o semiárido, é um consenso na comunidade científica e na de engenharia hidrológica (Srinivasan et al., 2003). As bacias experimentais foram instaladas no semiárido nordestino, com o objetivo de servir como fonte de informações para estudos sobre os impactos das modificações do meio ambiente e para o conhecimento do comportamento hidrossedimentológico nessa região.

Nesse sentido, a quantificação da erosão do solo e produção de sedimentos, através do monitoramento ou modelagem dos sedimentos produzidos por diferentes usos e manejo de solo torna-se importante para a gestão adequada dos recursos naturais do solo e água bem como para planejamento conservacionista do uso do solo da bacia hidrográfica.

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas é um problema complexo. Machado (2002) identifica como a maior limitação na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico, no qual essa variabilidade implicará em limitações na aplicação de modelos. As dificuldades se tornam ainda maiores para modelar satisfatoriamente os processos de erosão do solo e transporte dos poluentes pelo escoamento superficial.

Neste contexto, a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) integrado ao modelo hidrológico atenua este problema de gerenciamento e manipulação

de dados. Segundo Tsou e Whittemorez (2001), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) fornece uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e exibir dados e pode facilitar a compilação destes, a calibração do modelo e a exibição de parâmetros e resultados.

Atualmente, através dos SIGs, pode-se obter uma descrição espacial detalhada de variáveis da região em estudo vinculadas a modelos hidrológicos distribuídos, contribuindo assim para se conhecer com maiores detalhes os processos complexos que, quando analisados de forma conjunta, convergem para uma maior precisão para análise do fenômeno (Gomes e Rodrigues, 1998).

Um dos modelos mais utilizados no mundo para simular os processos da erosão do solo e transporte de poluentes é o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT. Este é um modelo distribuído que pode ser acoplado a um ambiente SIG, que considera a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. O SWAT foi desenvolvido com o objetivo de estimar o impacto de diferentes práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água, na perda do solo e carga de poluentes em uma bacia hidrográfica (Neitsch et al., 2005). Obtêm

A necessidade de planejar adequadamente o aproveitamento dos recursos de solo na região semiárida do Brasil é indiscutível, mas, são poucos os estudos no Brasil e quase nenhum na região nordestina sobre o uso da modelagem hidrossedimentológica para auxiliar no processo do planejamento das bacias hidrográficas. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo aplicar o modelo SWAT na Bacia Representativa de Sumé (BRS), localizada na parte superior da bacia do Rio Paraíba – PB e através dos processos de parametrização e simulações, verificar as alternativas do uso do solo para minimizar as perdas do solo e maximizar o escoamento superficial. A partir da simulação de diferentes cenários de uso do solo poder-se-á verificar as melhores alternativas para o uso racional dos recursos de solo, água e vegetação na BRS.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Este capítulo apresentará os fundamentos científicos embasadores deste trabalho, discorrendo sobre conceitos básicos relacionados aos processos hidrológicos, bacias hidrográficas, o fenômeno da erosão e transporte de sedimentos, o planejamento conservacionista de bacias hidrográficas, modelos hidrológicos e sua integração com o Sistema de Informações Geográficas.

### 2.1 Processos hidrológicos em bacias hidrográficas

“O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre” (Silveira, 2009). Apesar de tratar-se de um sistema cíclico, o ciclo hidrológico só é fechado em nível global, devido à dinâmica dos processos envolvidos.

A interação entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera ocorre em dois sentidos: (a) no sentido superfície-atmosfera, onde o fluxo da água ocorre fundamentalmente na forma de vapor, como decorrência dos fenômenos de evaporação e de transpiração, sendo este um fenômeno biológico; (b) no sentido atmosfera-superfície, onde a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, porém com a precipitação de chuva sendo a mais significativa.

O ciclo hidrológico é acionado pela energia solar, que retira água através da evaporação da superfície do mar e da superfície terrestre. Essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera que é extremamente dinâmico e não-linear, dificultando sua previsão quantitativa. Esse sistema cria condições de precipitação pelo resfriamento do ar úmido que formam as nuvens gerando a precipitação.

Quando a precipitação ocorre sobre a superfície terrestre, parte do volume precipitado é interceptado pela cobertura vegetal e/ou depressões, retornando a atmosfera através da evaporação. A água que cai sobre o solo tem diferentes destinos, enquanto o solo não estiver saturado, há infiltração da água no mesmo, parte do volume infiltrado será aproveitado pelos vegetais e retornará a atmosfera por meio da transpiração (Silveira, 2009).

A parte da água que infiltrou e não foi sujeita à evapotranspiração, percola no interior do solo, impulsionada pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade, até

atingir o reservatório das águas subterrâneas. O escoamento superficial ocorre quando a taxa de água que atinge o solo supera a taxa de infiltração ou mesmo quando o solo está devidamente saturado (Hillel, 2004). Tanto o escoamento subterrâneo quanto o superficial podem deslocar-se para alimentar os rios, lagos e oceanos, reiniciando o ciclo. Na Figura 2.1 pode-se visualizar um corte esquemático do continente com as diversas fases do ciclo hidrológico.

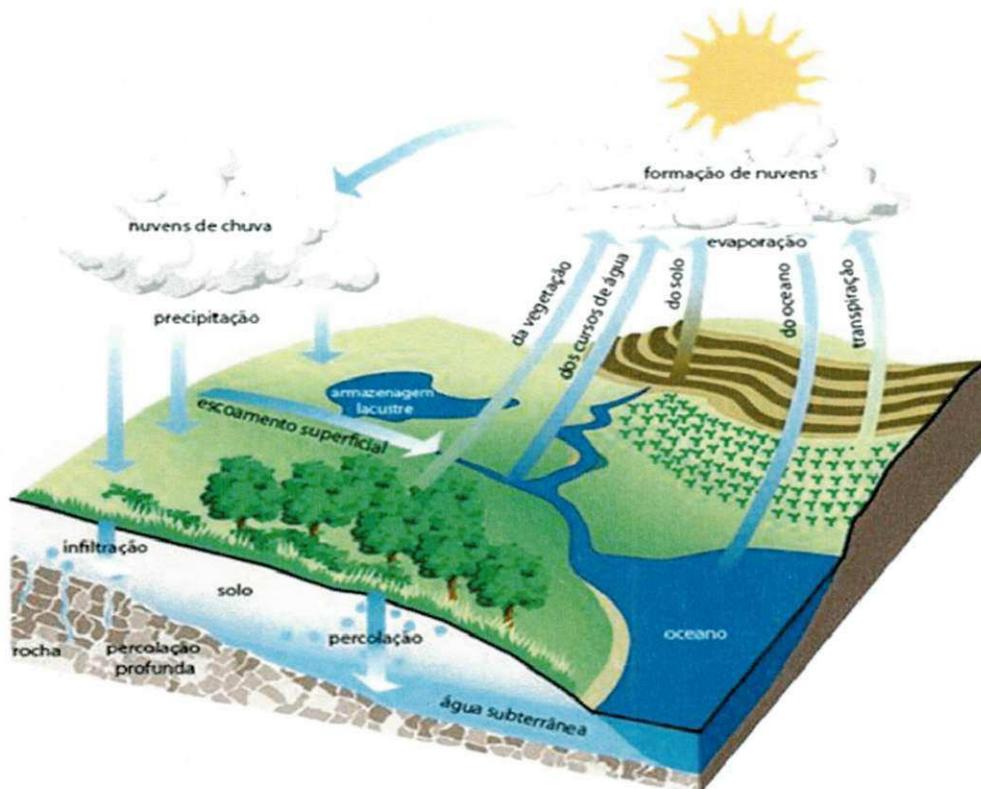


Figura 2.1 - Ciclo hidrológico (Fonte: *Federal Interagency Stream Restoration Working Group*, 1998)

A unidade fundamental de estudo na fase terrestre do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica, podendo apresentar-se em diferentes escalas. Silveira (2009) afirma que “a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente”.

De acordo com Coelho Netto, (2001), a bacia hidrográfica, ou a bacia de drenagem, representa um sistema hidrogeomorfológico, onde encostas, topos, fundos de vale, canais, corpos de água subterrânea, sistemas de drenagem urbanos e áreas

irrigadas, entre outras unidades espaciais, estão interligados como componentes de bacias de drenagem. É uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial.

As bacias hidrográficas são uma importante unidade espacial utilizada para gerenciar atividades de uso e conservação dos recursos naturais. A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão.

As alterações provocadas nas bacias através das ações antrópicas resultam em alterações no ciclo hidrológico, devido principalmente às modificações nas formas de uso do solo. Desta forma, torna-se necessário recorrer a estudos de cenários alternativos de uso dos recursos naturais da bacia, que correspondam às diversas combinações dos usos mais relevantes a nível de planejamento.

Neste contexto, estudos em Bacias Representativas que são aquelas cujas características hidrológicas são típicas de uma determinada região (Lopes, 2003), podem ser muito úteis, pois, os resultados obtidos podem ter uma aplicação geográfica bem maior do que da própria bacia.

## **2.2 Processos hidrossedimentológicos**

Os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos. Como ressalta Semmelmann (2005), “paralelamente ao ciclo da água, existe outro processo, aberto, intimamente vinculado ao ciclo hidrológico e deste totalmente dependente, que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia, conhecido como processo hidrossedimentológico”.

A erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento e constitui, sem dúvida, a principal causa do depauperamento acelerado do solo (Bertoni e Lombardi Neto, 2005). Segundo Hudson (1995) a erosão pode ser considerada como erosão geológica ou natural, quando esta resulta apenas das forças da natureza, ou erosão acelerada, neste caso o processo erosivo é influenciado pelo homem.

A produção de sedimentos é resultado dos processos de erosão, transporte e deposição. A quantidade total de material que é mobilizado em uma bacia hidrográfica é conhecida como erosão bruta ou erosão total, que inclui material particulado e dissolvido. Porém de acordo com Uzeika (2009), nem todo o material que é destacado de um determinado local da bacia é transportado até seu exutório. Essa condição é decorrente do grau de seletividade de grãos que cada modalidade de erosão apresenta no processo de remoção e transporte, e, principalmente, devido à dinâmica dos processos na rede de drenagem da bacia.

Dá-se o nome de perda de solo à diferença entre a quantidade do material que foi erodido e a quantidade depositada numa área. Este fator é geralmente expresso em kg/ha ou t/km<sup>2</sup>. Se for considerada uma seção de medição para a saída dos sedimentos, o material que passará por essa seção por unidade de tempo é denominado de produção de sedimento, geralmente expresso em t/km<sup>2</sup>/ano (Aragão, 2000).

Para Guerra e Cunha (2001), os fatores controladores da erosão são aqueles que determinam as variações nas taxas de erosão (erosividade da chuva, erodibilidade do solo, cobertura vegetal e topografia do terreno). É por causa da interação desses fatores que certas áreas erodem mais que outras, e a intervenção do homem pode alterar esses fatores de forma a apressar ou retardar os processos erosivos.

De forma geral, nas porções altas de uma bacia, há maior erosão e transporte de sedimentos. A erosão vai diminuindo a partir da porção alta para a porção média da bacia à medida que as declividades decrescem e as chuvas se tornam menos intensas, fora das regiões montanhosas. Logo, a degradação dos solos predomina na parte alta da bacia, enquanto a diminuição gradual predomina na parte baixa (Carvalho, 2008).

De acordo com Machado (2002), a pesquisa sobre erosão vem sendo desenvolvida intensivamente sob vários pontos de vista em todas as partes do mundo. Isto é, o tema erosão vem sendo pesquisado no sentido de produzir conhecimento técnico-científico dentro de áreas como hidrologia, pedologia, agronomia, dentre outras.

### *2.2.1 Erosão hídrica*

Os principais agentes dinâmicos externos do processo de erosão são a água, o vento, a gravidade, o gelo e os agentes biológicos, como a ação humana, podendo estes atuar combinados ou isoladamente (Carvalho, 2008). A água é um dos principais agentes causadores do desprendimento de partículas de rochas e solos (erosão hídrica),

estas irão percorrer a encosta da bacia até atingir os cursos d'água e, finalmente, alcançar o exutório e irão contribuir para a produção de sedimentos da bacia. A produção de sedimentos pela erosão e a sua transferência para a calha fluvial, bem como os processos de transporte, deposição e erosão nas próprias calhas fluviais compreendem o processo hidrossedimentológico em bacias hidrográficas.

Os processos de erosão hídrica estão relacionados, além dos efeitos dos impactos das gotas da chuva, com os caminhos que a água percorre em seu curso pela cobertura vegetal e seu movimento sobre a superfície do solo. Segundo Carvalho (2008) no meio natural, o despreendimento da partícula no processo da erosão ocorre através da energia de impacto das gotas de chuva no solo e pelas forças geradas devido ao processo de escoamento superficial (ação esta denominada cisalhamento). As gotas de chuva caindo em terrenos inclinados desagregam as partículas, provocam o deslocamento e lavam o solo, removendo a camada superficial.

A erosão causada pela água pode acontecer nas formas laminar, em sulcos e na forma de ravinas ou voçorocas, sendo que as três formas de erosão citadas também podem ocorrer simultaneamente no mesmo local. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2005), a erosão laminar é a remoção de camadas delgadas de solo sobre toda uma área, arrastando primeiro as partículas mais leves do solo e, considerando que a parte mais ativa do solo e de maior valor é a integrada pelas menores partículas, pode-se julgar os efeitos desta forma de erosão sobre a fertilidade do solo. Já a erosão em sulcos resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno fazendo com que a precipitação atinja volume e velocidade suficientes para formar riscos mais ou menos profundos no solo. Grandes concentrações de precipitação que passam no mesmo sulco por um longo período, ocasionam a ampliação deste pelo deslocamento de grandes massas de solos e formam grandes cavidades em extensão e profundidade originando a voçoroca ou ravina.

Os sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas granulometrias e sofrerão um processo de transporte variado de acordo com as condições locais e de escoamento. As forças que atuarão sobre a partícula podem mantê-la em suspensão ou no fundo do rio, saltando do leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito (Vanoni, 1977). Desta forma, para haver mobilidade da partícula é necessário que a força exercida pelo fluxo supere a resistência exercida pela partícula. Esta resistência é resultado, principalmente, do peso do sedimento e seu arranjo, no caso das partículas de areia, e coesão, para a situação de partículas finas como argila (Raudkivi, 1976). De

acordo com Carvalho (2008) “quando essas forças se reduzem até a condição de não poderem continuar a deslocar a partícula, ocorre o processo de deposição. A deposição geralmente acontece em deltas de rios e em áreas onde a velocidade do fluxo é bastante reduzida”.

A carga em suspensão, em geral, constitui-se de partículas finas (silte e argila), que se conservam suspensas na água até a velocidade crítica, que corresponde à menor velocidade requerida para uma partícula de determinado tamanho movimentar-se.

A carga do fundo é formada por partículas de tamanhos maiores (areia, cascalho ou fragmentos de rocha) que rolam ou deslizam ao longo do leito fluvial. A velocidade, nesse tipo de carga, tem participação reduzida, fazendo com que os grãos se movam lentamente (Cunha, 2001).

### 2.2.2 *Influência da cobertura vegetal*

A cobertura vegetal é um fator condicionante do processo erosivo. Brandt (1986) ressalta que o tipo de vegetação pode atuar de duas maneiras: (a) reduzindo o volume de água que chega ao solo, através da interceptação, e (b) alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva, afetando, com isso, a energia cinética da chuva.

De acordo com Lima (2003) em uma superfície sem cobertura vegetal, a precipitação ocorre diretamente sobre o mesmo, ocasionando a desagregação e o transporte das partículas de solo, bem como o selamento dos poros na superfície pelas partículas finas, diminuindo a sua capacidade de infiltração.

De acordo com Cooke e Doornkamp (1990), a cobertura vegetal reduz as taxas de erosão do solo através da proteção contra o impacto da chuva, diminuição da água disponível ao escoamento superficial, decréscimo da velocidade de escoamento superficial e aumento da capacidade de infiltração de água no solo.

Segundo Srinivasan et al., (2003) o retardo do fluxo e o aumento da infiltração no solo, pela vegetação, proporcionam um excelente mecanismo de proteção ao solo raso contra a erosão. Hudson (1995) relata que a cobertura vegetal funciona como uma capa protetora para o solo e a sua presença é o fator chave na redução da erosão hídrica.

De acordo com Pruski (2009) quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo contra a ação da chuva, menor será nele a possibilidade de ocorrência de erosão. A cobertura vegetal na superfície também reduz a velocidade de escoamento superficial, pelo aumento da rugosidade hidráulica do seu processo.

A presença ou a ausência de boa cobertura vegetal e práticas de conservação do solo determinam a quantidade de sedimentos gerados pela erosão superficial. Segundo Bruijnzeel (1990), os efeitos das mudanças nos usos do solo na produção de sedimentos na bacia serão fortemente determinados pela forma de processos de produção e remoção de sedimentos da bacia sob condições naturais.

A vegetação caatinga, característica de regiões semiáridas, apresenta uma enorme variabilidade espacial e temporal, estas variações produzem os mais diversos impactos no ciclo hidrossedimentológico. Segundo Santos et al., (2000) o escoamento superficial é um dos primeiros fatores a serem alterados quando a cobertura vegetal da bacia é modificada e, conseqüentemente, a produção de sedimentos.

Diversas pesquisas já foram realizadas com o intuito de analisar a influência da cobertura vegetal sobre a erosão em regiões semiáridas. Santos et al., (2000) analisaram esta influência com dados coletados na Bacia Experimental de Sumé e desenvolveram uma equação empírica da perda de solo. Os dados observados em várias parcelas de erosão mantidas em condições de cobertura vegetal distintas indicaram que a produção de sedimentos diminui significativamente quando o solo está protegido pela vegetação nativa ou pela cobertura morta.

Silva et al., (2011) analisaram as perdas de solo e água sob diferentes sistemas de manejo e cobertura do solo e concluíram que, as perdas de solo para as parcelas experimentais mantidas com vegetação caatinga foram inferiores aos valores obtidos nas parcelas mantidas desmatadas, comprovando assim, a importância deste tipo de vegetação na proteção do solo.

O interessante trabalho realizado por Albuquerque et al (2001) com o objetivo de avaliar os efeitos do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água sob chuva natural nas condições edafoclimáticas do sertão dos Cariris no Estado da Paraíba, apresentou na parcela com caatinga nativa, quando comparada com a parcela desmatada, redução da perda de solo em cerca de 98% e a perda de água em torno de 73%, proporcionando um aumento considerável na infiltração de água no solo, conseqüentemente contribuindo para a redução da erosão hídrica.

Cunha et al., (2011), utilizando técnicas de sensoriamento remoto, analisaram a dinâmica interanual da cobertura do solo em uma bacia do semiárido, cuja vegetação predominante é do tipo caatinga. Foram identificadas pelos autores as variações no Índice de área Foliar (IAF) e temperatura de superfície ao longo do ano para as diversas

classes de cobertura do solo analisadas. Cabe lembrar que a quantidade de biomassa está relacionada com a proteção contra a erosão hídrica que a cobertura vegetal proporciona.

Em fim, para uma boa compreensão da relação entre as alterações do uso do solo e seus efeitos nos processos hidrossedimentológicos é necessário o monitoramento de bacias hidrográficas, de tal forma que se possam quantificar suas influências no escoamento superficial e produção de sedimentos.

### *2.2.3 Os problemas relacionados com os sedimentos*

Carvalho (2008) relata que o estudo da erosão é muito importante sob os aspectos sociais e econômicos, uma vez que é responsável pelos danos em terras agricultáveis e em outras áreas de interesse imediato, bem como pelos efeitos indiretos de assoreamento dos rios e lagos.

Os problemas causados pelos sedimentos são muitos e variados, e apesar de ser um fenômeno complexo, seus efeitos podem ser facilmente identificados. A Figura 2.2 apresenta diversos problemas gerados pelos sedimentos descritos por Carvalho (2008). A degradação dos solos pode ser considerada um dos mais importantes problemas ambientais das atividades agrícolas nos dias atuais, resultado de práticas inadequadas de cultivo.

A agricultura é uma atividade que causa impactos ambientais, decorrentes da substituição de uma vegetação naturalmente adaptada por outra que exige a contenção do processo de sucessão natural, gerando um desafio ambiental que consiste em buscar formas de produção agrícola que minimize os prejuízos no solo causado por tais atividades, sendo necessário o conhecimento de seus diversos aspectos acerca da natureza dos mesmos e dos fatores que condicionam a sua produtividade e o seu depauperamento (Assad e Almeida, 2004).

Para haver utilização racional dos recursos naturais do solo devem ser considerados dois princípios básicos da agricultura: mecanização e a conservação; devem estar agindo concomitante e equilibradamente no interesse da produção, com os cuidados exigidos para a manutenção de sua fertilidade (Fernandes et al., 2010).

#### Problemas devido à erosão

- Aumento do risco de desertificação;
- A erosão nas cabeceiras dos rios provoca a destruição das nascentes;
- Remoção da camada fértil do solo, ocasionando o empobrecimento do mesmo;
- Alteração das condições de escoamento da água na superfície e na calha do rio; e
- Erosão em torno de estruturas e obras.

#### Problemas devido ao transporte de sedimentos

- As partículas em suspensão degradam o uso consultivo da água, aumentando seu custo de tratamento;
- O aumento da turbidez, reduz a qualidade estética da água;
- O sedimento em suspensão impede a penetração da luz e do calor reduzindo a atividade fotossintética do corpo hídrico;
- O sedimento pode atuar como portador de poluentes;
- A carga sólida provoca uma perturbação na forma do canal; e
- Durante enchentes, o impacto das partículas em estruturas pode danificar suas fundações.

#### Problemas devido ao depósito de sedimentos

- A deposição de sedimentos em reservatórios provoca redução do volume de água passível de ser armazenado e a redução da vida útil da represa;
- Pode assorear rios, prejudicando a vida aquática, e mesmo terrestre, além da navegação;
- A deposição pode reduzir ou impedir o crescimento de vegetais ou, inversamente, pode favorecer ao crescimento de vegetais em área inapropriada; e
- A deposição de sedimentos pode reduzir a drenagem superficial.

Figura 2.2 - Problemas gerados pelos sedimentos (Adaptado de Carvalho, 2008)

### 2.3 Planejamento conservacionista de bacias hidrográficas

Conservar é aplicar um conjunto de técnicas ao solo, de maneira a ser obtido um rendimento maior e constante e tem a finalidade de manter ou aumentar a produtividade sem que, contudo, haja degradação de suas propriedades físicas, químicas ou biológicas. Fernandes e Lima (2009) apresentam como vantagens da conservação do solo:

- Prevenção e controle da degradação do solo;
- Aumento da produção;
- Manutenção dos níveis de fertilidade natural mais elevado;
- Redução do consumo de fertilizantes e corretivos, possibilitando a produção econômica com menos custos;
- Conservação dos recursos naturais (flora e fauna) em áreas impróprias à agricultura;

- Melhoria do nível de vida rural e, conseqüentemente, a fixação do homem à terra, evitando o êxodo rural;
- Contribuição para a melhor conservação das águas armazenadas;
- Prevenção da poluição dos recursos hídricos;
- Melhoria da manutenção da umidade do solo, reduzindo os danos causados pelas secas;
- Prevenção contra o assoreamento de represas e obras hidráulicas; e
- Proporcionar as gerações futuras condições de vida mais condigna e agradável.

Neste contexto, para que a exploração agrícola possa ser conduzida em bases conservacionistas, torna-se necessário um planejamento racional; levando em consideração o conjunto de seus principais atributos físicos, ecológicos e econômicos. “O planejamento conservacionista tem a finalidade de maximizar a produtividade das terras agrícolas, por meio de um sistema de exploração eficiente, racional e intensivo, que assegure também a continuidade da capacidade produtiva do solo” (Pruski, 2009).

Para Bertoni e Lombardi Neto (2005) “algumas das causas do esgotamento de nossos solos pela erosão podem ser controladas, e todas as técnicas utilizadas para aumentar a resistência do solo ou diminuir as forças do processo erosivo denominam-se práticas conservacionistas”. Silva et al. (2011) ressaltam que a utilização de sistemas conservacionistas afeta o armazenamento de água no solo e tende a aumentar a condutividade hidráulica, próximo à superfície do mesmo.

Para fins de planejamento, há a necessidade de levantamento das características condicionadoras da capacidade de uso do solo, uma vez que, a utilização racional terá que levar em conta a potencialidade de exploração de cada solo cultivável. Para um eficaz planejamento de uso do solo, quanto maior for o detalhamento do levantamento, mais sólidas serão as bases para sua correta utilização (Bertoni e Lombardi Neto, 2005).

O processo erosivo deve ser minimizado com o uso integrado de técnicas que considerem o ambiente como um todo. De acordo com Pruski (2009) “todo o esforço visando à redução da erosão hídrica deve estar voltado, portanto, à minimização do impacto associado aos agentes responsáveis pelo desprendimento das partículas de solo e à redução da capacidade de transporte do escoamento superficial”.

São várias as técnicas de conservação do solo utilizadas, podendo ser agrupadas em vegetativas, edáficas e mecânicas (Figura 2.3). As práticas de caráter edáfico são

aquelas cujas modificações no sistema de cultivo, além do controle da erosão, mantêm ou melhoram a fertilidade do solo; já as práticas de caráter vegetativo utilizam a própria vegetação para proteger o solo contra a ação erosiva direta da precipitação, minimizando seus efeitos e as práticas mecânicas recorrem à implantação de estruturas de terra para conter o escoamento superficial.



Figura 2.3 – Tipos de Práticas Conservacionistas

As técnicas de caráter vegetativo e edáfico são de mais fácil aplicação, menos dispendiosas e mantêm os terrenos cultivados em condições próximas ao seu estado natural, devendo, portanto, ser privilegiadas. Recomenda-se a adoção das técnicas mecânicas em terrenos muito susceptíveis à erosão, em complementação às técnicas vegetativas e edáficas (Guerra et al, 1999).

Nas práticas de caráter vegetativo a densidade da cobertura vegetal é o princípio fundamental de toda a proteção que se oferece ao solo, preservando-lhe a integridade contra os efeitos da erosão. Dentre este tipo de prática se destaca o florestamento e reflorestamento, onde segundo Bertoni e Lombardi Neto (2005) “as terras de baixa capacidade de produção e, ao mesmo tempo, muito susceptíveis à erosão, deverão ser recobertas de vegetação permanentes bastante densas, como as florestas, permitindo, assim, uma utilização econômica das terras inadequadas para a cultura, e proporcionando-lhes, ao mesmo tempo, a preservação”.

Ainda segundo Bertoni e Lombardi Neto (2005), para certos solos muito inclinados, muito pobres ou muito erodidos, a cobertura com floresta é a maneira mais econômica e segura de conservação e utilização. Nestas regiões, as florestas devem ser formadas no topo dos morros a fim de reduzir as enxurradas que se formam nas cabeceiras, atenuando os problemas de controle de erosão nos terrenos situados mais em baixo, e proporcionando, pela maior infiltração, uma regularização das fontes de água.

A Legislação Brasileira, em seu artigo 2º da Lei nº 4771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, visando resguardar ou recompor a vegetação natural, considera de preservação permanente as áreas marginais dos rios (matas ciliares), ao redor das lagoas, no topo de morros, nas encostas com declividade superior a 45°, nas nascentes, etc.

O eficaz planejamento de uso da terra e manejo do solo em bases conservacionistas de uma bacia hidrográfica exige o conhecimento das complexas interações entre os fatores ambientais, particularmente aqueles associados ao uso da terra e manejo do solo, demandando a utilização de tecnologias de suporte para o pleno diagnóstico e compreensão de reflexos de tais interações na capacidade de uso da terra.

Neste contexto, a predição da erosão hídrica e sua aplicação no planejamento de uso da terra são importantes, tanto do ponto de vista agrícola, quanto ambiental. Para isso, é necessário quantificar os fatores envolvidos na modelagem de erosão hídrica e, posteriormente, simular cenários de uso e manejo do solo que sirvam de suporte na tomada de decisão acerca do planejamento conservacionista da região.

A análise conjunta de dados dos fatores edáficos, topográficos e de uso da terra, integrados por meio de um SIG e simulados em um modelo, provê uma visão global e sistêmica dos processos e fenômenos atuantes em uma bacia hidrográfica, fornecendo subsídios para a adoção de planos de uso da terra e de manejo do solo, em bases conservacionistas (Santos, 2010).

## **2.4 Modelos Hidrológicos**

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem. Tucci (2005) define modelo como a “representação de algum objeto ou sistema, em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”.

De acordo com Tucci (2005) os modelos podem ser classificados em físicos, analógicos e matemáticos. O modelo físico representa o sistema por um protótipo em escala menor, já os modelos analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente o sistema desejado. Enquanto que os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema, através de equações matemáticas.

Os modelos matemáticos são os mais versáteis, devido principalmente a facilidade de modificar as suas entradas e assim obter respostas diferentes na simulação do sistema, esta característica o torna amplamente utilizado na modelagem hidrológica.

Sendo um modelo uma representação do comportamento de um sistema, no caso dos modelos hidrológicos a bacia hidrográfica é o sistema objeto de estudo, e como tal, responde através de uma saída, a uma entrada. Neste contexto, a utilização de um modelo matemático hidrológico em uma bacia hidrográfica tem por objetivo buscar respostas para as diferentes entradas através das diversas equações matemáticas que configuram o fluxo de água.

Os modelos hidrológicos podem ainda ser classificados segundo vários critérios, Rennó (2003) os distingue através de suas diferentes características, tais como: variabilidade espacial, representação dos dados, variáveis utilizadas e a relação existente entre as variáveis do modelo (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Classificação dos modelos hidrológicos

Um modelo é dito concentrado quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia, enquanto que o modelo é distribuído quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou tempo Tucci (2005). Os modelos distribuídos permitem analisar, com melhor embasamento, modificações naturais ou antrópicas nas bacias hidrográficas, o que é praticamente inviável com os modelos concentrados, devido ao excesso de empirismo e da característica concentrada da sua formulação. Porém, Tucci (2005) ressalta que na prática não existem modelos puramente

distribuídos, já que são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma forma, tornam o modelo distribuído concentrado numa pequena subdivisão.

A representação dos dados num sistema pode ser de forma contínua ou discreta. No primeiro caso, os fenômenos são considerados contínuos no tempo, no segundo as mudanças de estado se dão em intervalos discretos.

Quando as chances de ocorrência das variáveis forem levadas em consideração, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Por outro lado, quando para uma mesma entrada das variáveis, o modelo produz a mesma saída, o modelo é classificado como determinístico (Chow, 1964).

Os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Já os modelos empíricos são aqueles que utilizam funções que não tenham relação com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão. Os modelos empíricos utilizam funções matemáticas ou advindas de ajustes estatísticos visando a melhor representação da saída com base na entrada. As principais dificuldades encontradas no uso desses modelos têm sido o empirismo dos parâmetros e as incertezas quanto aos prognósticos da faixa de ajuste.

Os modelos conceituais podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos (Tucci, 2005). Os semiconceituais estão relacionados às características do processo, embora mantenham um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, enquanto que os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema.

### ***Modelos Hidrossedimentológicos***

Entre os modelos hidrológicos, há aqueles que possuem equações ou modelos capazes de investigar também os processos sedimentológicos e por este motivo são chamados modelos hidrossedimentológicos (Carvalho Neto, 2011).

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

O processo de erosão é bastante complexo de ser modelado, uma vez que, a modelagem deste depende da resposta do modelo hidrológico. Dentre os modelos usualmente utilizados na modelagem hidrossedimentológica destacam-se os de base física. Figueiredo (1998a) elenca algumas vantagens dos modelos de erosão de base física, tais como: a técnica de modelagem é baseada na física dos processos, os parâmetros possuem significado físico, a bacia é considerada um sistema espacialmente variável com entradas variáveis e parâmetros mensuráveis, possibilidade da extrapolação para áreas hidrológicamente homogêneas não observadas, aplicabilidade onde existem variações na topografia, uso de solo, cobertura vegetal e clima, consideração de áreas mais complexas, melhor precisão na modelagem dos eventos individuais, etc.

Para descrever e estimar a erosão hídrica e a produção de sedimentos, inúmeros modelos e relações foram desenvolvidos nas últimas décadas, variando consideravelmente em seus objetivos, escalas espacial e temporal, e também nas suas bases conceituais (Jakeman et al., 1999).

A distribuição espacial da erosão do solo consiste em uma das várias contribuições que a utilização de modelos distribuídos no planejamento conservacionista de bacias hidrográficas pode oferecer.

A intervenção eficiente no controle da erosão em bacias rurais requer a aplicação de modelos capazes de estimar satisfatoriamente a produção dos sedimentos. O uso de modelos distribuídos no espaço consiste de uma poderosa ferramenta para análise ambiental em escala de bacias hidrográficas, destacando-se os modelos hidrossedimentológicos (Silva et al., .2008).

Há diversos anos o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande estuda os processos erosivos em bacias hidrográficas, principalmente em regiões de clima semiárido, para isto, vem utilizando vários modelos hidrossedimentológicos, dentre eles:

- O modelo KINEROS (*Kinematic Runoff Erosion Model*): proposto por Woolhiser et al. (1990) que incorporaram ao modelo hidrológico de Rovey et al. (1977) componentes de erosão, transporte e deposição. O KINEROS é um modelo de eventos, distribuído, não linear, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento.
- O modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*): desenvolvido por Lopes e Lane (1987) com o intuito de fornecer subsídios para um melhor

entendimento dos processos de escoamento superficial e erosão, servindo como ferramenta de base física para obter estimativas eventuais do escoamento superficial e erosão do solo em pequenas bacias na região semi-árida.

- O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*): elaborado por Flanagan e Nearing (1995) é um modelo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado às grandes bacias. Esse modelo é conceitual, e considera a física do solo, a ciência das plantas e a mecânica da erosão.
- O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*): desenvolvido pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*), é um modelo distribuído contínuo e de base física. Este modelo foi desenvolvido para prever o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e carga de poluentes em bacias hidrográficas agrícolas (Srinivasan e Arnold, 1994).

Há diversos modelos de predição da erosão, com os mais variados graus de complexidade, estes podem ser efetivamente utilizados para investigar regiões vulneráveis quanto à erosão e estimar a produção de sedimentos de acordo com o uso do solo. Entretanto, estes modelos são complexos e requerem uma grande quantidade de dados de entrada que variam temporal e espacialmente. Neste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados.

O modelo ArcSWAT possui a interface integrada ao SIG (Sistema de Informações Geográficas), o que resulta em grandes vantagens quanto ao gerenciamento e manipulação de dados, bem como na visualização dos resultados. Desta forma, este modelo é a ferramenta utilizada neste trabalho e será descrita com mais detalhes no Capítulo 3.

## **2.5 Integração entre SIG e modelos hidrológicos**

A modelagem hidrológica em bacias hidrográficas é um problema complexo. Machado (2002) identifica como maior limitação na utilização dos modelos a dificuldade de manipular a grande quantidade de dados relacionados com a variabilidade espacial e temporal das características que descrevem a heterogeneidade

do comportamento hidrológico, no qual essa variabilidade implicará em limitações na aplicação de modelos.

Segundo Mendes (1996), a utilização de técnicas de geoprocessamento constitui-se um instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água.

A utilização de modelos hidrológicos distribuídos tem apresentado significativas melhorias na realização de simulações hidrológicas, principalmente pela capacidade do modelo em representar a variabilidade espacial do sistema. Todavia, um dos problemas da utilização desses modelos são o gerenciamento e manipulação de grande quantidade de informações necessárias ao processo de modelagem.

Neste contexto, Tucci (2005) afirma que os SIG e o Sensoriamento Remoto auxiliam na aquisição dos dados físicos, fazendo parte da estrutura de entrada de alguns modelos, ou seja, a integração entre SIG e modelos hidrológicos atenua principalmente os problemas de manipulação e gerenciamento de dados. Segundo Tsou e Whitemorez (2001), um Sistema de Informação Geográfica (SIG) fornece uma plataforma integrada para gerenciar, analisar e exibir dados e pode facilitar a compilação destes, a calibração do modelo e a exibição de parâmetros e resultados.

Para Teixeira et al., (1992) os Sistemas de Informações Geográficas incluem-se no ambiente tecnológico que convencionou-se chamar de geoprocessamento, cuja área de atuação envolve a coleta e tratamento da informação espacial.

As principais características de SIGs estão em integrar, em uma única base de dados, informações provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; e oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e inserir o conteúdo da base de dados georreferenciados. (Dutra et al., 1997 apud Xavier, 2009).

Atualmente, através dos SIGs, pode-se obter uma descrição espacial detalhada de variáveis da região em estudo vinculadas a modelos hidrológicos distribuídos, contribuindo assim para se conhecer com maiores detalhes os processos complexos que, quando analisados de forma conjunta, convergem para uma maior precisão para análise do fenômeno (Gomes e Rodrigues, 1998).

A integração dos SIGs com modelos hidrológicos permite a realização de inúmeras operações relacionadas à modelagem hidrológica de forma fácil e eficiente,

tais como a caracterização física da bacia hidrográfica, delimitação, geração da rede de drenagem, divisão da bacia hidrográfica em áreas homogêneas, etc.

Com relação aos dados de entrada, Machado (2002) relata que os mesmos podem ter origem das mais diversas fontes (imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solo, hidrografia, etc) e em diferentes escalas e cujos resultados são gerados comumente em forma de mapas.

Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados. Há pelo menos três maneiras de utilização de um SIG: como ferramentas para produção de mapas; como suporte para análise espacial de fenômenos e como banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Um modelo digital de elevação (MDE) fornece informações suficientes para que em um ambiente SIG sejam analisadas as declividades do terreno, estabelecida a direção do fluxo superficial e, por conseguinte, gerada a rede de drenagem para a bacia. A partir do conhecimento do exutório facilmente uma bacia pode ser delimitada. Através também da classificação de imagem de satélite, é possível analisar as mudanças de cobertura vegetal de uma área e, ainda, prever e localizar os impactos causados pela ação antrópica, permitindo um gerenciamento de bacias mais eficiente e eficaz.

Percebe-se que a integração entre modelos hidrológicos e SIG é uma tendência na área, desta forma, a classificação das diferentes abordagens metodológicas para a união entre estas ferramentas, de forma a facilitar a escolha por um método de integração foi o objetivo do estudo realizado por Melo (2010). O autor estabeleceu três critérios de classificação para o estudo destas abordagens de integração, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Critérios de classificação para integração entre modelos e SIG (Fonte: Melo, 2010)

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>	<b>Sub-classificação 1</b>	<b>Sub-classificação 2</b>
<b>Relacionamento de Dados</b>	Com compartilhamento	-	-
	Sem compartilhamento	-	-
<b>Modificação do Código Fonte</b>	Integração externa	-	-
	Integração interna	Modelo no SIG	Conectado
		SIG no modelo	Embutido
<b>Grau de Complexidade</b>	Integração básica	-	-
	Integração avançada	-	-

Segundo Melo (2010), o relacionamento entre os dados classifica o acoplamento entre subsistemas de acordo com a proximidade entre os dados. A integração com compartilhamento ocorre quando um subsistema acessa diretamente os dados armazenados conforme o modelo e a estrutura de dados do outro subsistema. Já na integração sem compartilhamento de dados não se observa a existência de um banco de dados único para o sistema acoplado, acarretando na necessidade de uma ferramenta externa para intercâmbio de dados, fazendo do SIG o gerenciador de tais dados. Enquanto que no compartilhamento de dados há troca de dados entre as ferramentas, que favorece o desempenho do modelo.

Quanto à modificação do código fonte, analisa-se se há ajustes nessa estrutura de forma a permitir o acoplamento. Este critério foi dividido em duas formas: interna e externa. Na integração externa não há modificação no código fonte, fazendo com que o SIG e o modelo sejam executados de maneira independente, não existindo interface entre eles.

Na integração interna há uma modificação no código fonte. Devido à complexidade envolvida nesta classe, há ainda uma subdivisão em que o SIG está contido no modelo ou, inversamente, o modelo está contido no SIG. Na primeira se observa um modelo hidrológico que é capaz de realizar a função clássica de visualização do espaço bem como da distribuição espacial dos resultados. Enquanto que o modelo que está contido no SIG em muito se assemelha a integração classificada como “acoplamento firme”. Nesta classificação o modelo é executado sobre a interface que o integra ao SIG, de tal forma que o modelo pode estar apenas conectado ao SIG ou embutido no mesmo.

Quanto ao grau de complexidade da integração, tem-se a integração básica na qual o SIG limita-se a sua funcionalidade de visualização de resultados e a integração avançada que proporciona também a integração de ferramentas de otimização com gerenciamento de dados por meio de ferramentas analíticas, gerando relatórios e previsões.

Diante do exposto, este trabalho utiliza como ferramenta de modelagem o modelo *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT que possui a interface ArcSWAT integrada ao SIG, onde os dados geoespaciais são transformados em informações necessárias para a aplicação do modelo. Este modelo será descrito com maiores detalhes no Capítulo 3.

## CAPÍTULO 3 – O MODELO SWAT

---

Neste capítulo são abordadas as características principais do modelo SWAT e exemplos de aplicações do mesmo em bacias hidrográficas no Brasil e no mundo. São descritas as equações que governam os processos do escoamento superficial e erosão na bacia hidrográfica.

### 3.1 Descrição geral do modelo

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático que permite que vários processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas para avaliar os impactos do uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas, mesmo não sendo instrumentadas (Srinivasan e Arnold, 1994).

O SWAT é um software livre, desenvolvido pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*) que incorpora fundamentos de vários modelos específicos que contribuíram de forma significativa para o seu desenvolvimento, sendo resultado direto do modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), este desenvolvido a partir da integração dos modelos GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*).

As características básicas do modelo SWAT são apresentadas por Arnold et al., (1998), como sendo:

- O modelo requer informações específicas sobre o clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo modelo utilizando esses dados de entrada. Um aspecto positivo dessa característica do modelo é que foi desenvolvido para ser aplicado em bacias não monitoradas;
- É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;

- É um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação;

A bacia é discretizada, com base no relevo, em sub-bacias, estas, por sua vez, são parametrizadas através das Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units – HRUs*). Cada HRU corresponde a uma única combinação de uso da terra, tipo do solo e declividade da superfície. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo considerar diferentes condições hidrológicas para diferentes usos e solos.

Segundo Baldissera (2005), o modelo foi desenvolvido para operar em intervalo diário e é capaz de simular longos períodos, para gerar os efeitos das variações de manejo no uso e ocupação do solo.

De acordo com Arnold et al., (1998), o escoamento é calculado para cada HRU e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia, o que aumenta a precisão das predições e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia. A estrutura do modelo é baseada em comandos para propagar o escoamento, os sedimentos e os produtos agroquímicos pela bacia, sendo estes comandos organizados em oito componentes principais, que são hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (Lopes, 2008).

O processo de modelagem com o SWAT se dá inicialmente através da inserção de dados relacionados às características físico-climática da bacia. Os dados de entrada no modelo SWAT correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs) e a dados alfanuméricos. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma de processamento do modelo SWAT.

Segundo a classificação de Melo (2010) quanto ao relacionamento entre os dados a integração entre o SWAT e o SIG é feita com compartilhamento destes. Já com relação ao grau de complexidade, há uma integração avançada caracterizada pela incorporação de processos mais complexos de simulação e análise do fenômeno em estudo. Ainda segundo a classificação proposto por Melo (2010), há integração interna entre estas ferramentas, estando o modelo conectado no SIG.

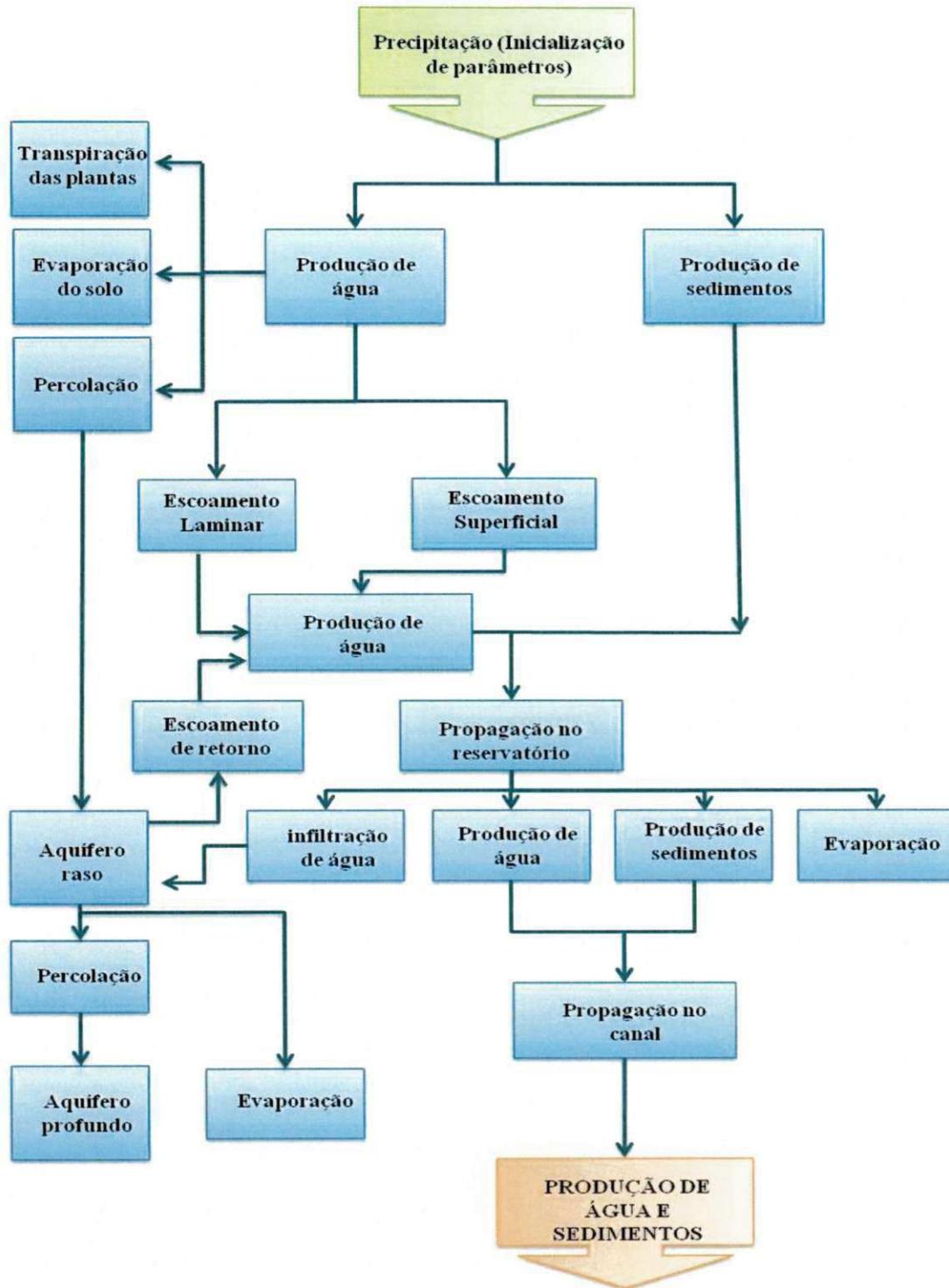


Figura 3.1 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT (Adaptado de King et al., 1996 apud Machado, 2002)

### 3.2 Descrição das equações do modelo

O modelo SWAT permite que vários processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica e a simulação hidrológica é realizada com dois componentes: o escoamento superficial ou a fase de água e a erosão e transporte de sedimentos ou a fase de sedimentos. Estes processos serão apresentados nesta seção e estão conforme a documentação teórica do modelo SWAT elaborada por Neitsch et al., (2011).

#### 3.2.1 Fase do sedimento no ciclo hidrológico

A fase do sedimento controla a quantidade de água (tratando efetivamente do ciclo hidrológico), sedimentos, nutrientes e pesticidas que chegam ao canal de cada sub-bacia. Os itens nutrientes e pesticidas serão suprimidos da descrição a seguir, por não serem objetos de estudo deste trabalho.

#### **Ciclo Hidrológico**

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é composto de quatro volumes de controle, são eles: reservatório superficial, reservatório subsuperficial, reservatório subterrâneo (aquífero raso) e reservatório subterrâneo (aquífero profundo). Neste sentido, o balanço hídrico é representado pela equação:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - W_a - Q_{sub}) \quad (3.1)$$

Sendo:

$SW_t$ : quantidade de água no solo no fim do dia (mm);

$SW_0$ : quantidade de água no início do dia (mm);

$t$ : intervalo de tempo (dias);

$P_d$ : precipitação no dia (mm);

$Q_{sup}$ : escoamento superficial (mm);

$E_a$ : evaporação diária (mm);

$W_a$ : quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm) e

$Q_{sub}$ : quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

A subdivisão da bacia permite ao modelo contabilizar as diferenças na evapotranspiração para diversas culturas e classes de solo. O escoamento é calculado separadamente para cada HRU e propagado para o exutório final da bacia, permitindo assim uma melhor descrição física do balanço hídrico (Neitsch et al., 2011).

### *Escoamento Superficial*

O escoamento superficial ocorre quando o excesso de precipitação escoar sobre a superfície, devido ao umedecimento do perfil do solo, o que reduz a sua capacidade de infiltração ou pela intensidade elevada de precipitação a qual supera a atual capacidade de infiltração do solo. O modelo SWAT simula o volume do escoamento superficial para cada sub-bacia através do Método da Curva-Número, um método empírico desenvolvido pelo *Soil Conservation Service – SCS*.

$$Q_{sup} = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (3.2)$$

Sendo:

$Q_{sup}$ : escoamento superficial (mm),

$P$ : precipitação (mm), e

$S$ : capacidade máxima de armazenamento do solo (mm)

O parâmetro  $S$  varia espacialmente, considerando mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (Neitsch, 2005). O parâmetro  $S$  está relacionado à CN, em unidades métricas, pela equação:

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.3)$$

O intervalo de variação de CN é de 1 a 100, sendo o valor inferior correspondente a uma cobertura do solo totalmente permeável e o valor superior a uma cobertura do solo totalmente impermeável, ou seja, todo o volume precipitado será convertido em escoamento superficial.

O valor de CN depende da condição da umidade antecedente do solo, e sendo assim, para os valores de Curva Número são consideradas três condições:  $CN_1$  indica a condição do solo em ponto de murcha;  $CN_2$  expressa a condição normal da umidade

média do solo e  $CN_3$  o solo na sua capacidade de campo. Os valores de CN para as condições de unidade 1 e 3 são obtidos com as equações:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN_2)])} \quad (3.4)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0,00673(100 - CN_2)] \quad (3.5)$$

### ***Retardo do escoamento superficial***

Em sub-bacias grandes com tempo de concentração maior que um dia, apenas uma parte do escoamento superficial atingirá o canal no dia em que é gerado. Desta forma, o modelo SWAT incorpora um recurso de armazenamento para retardar o escoamento até o canal principal.

Após o cálculo do escoamento superficial, o volume que atinge o canal principal é calculado através da equação:

$$Q_{sup} = (Q'_{sup} + Q_{arm,i-1}) \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{SURLAG}{t_{conc}}\right) \right] \quad (3.6)$$

Sendo:

$Q_{sup}$ : quantidade de água que chega ao canal principal por escoamento superficial (mm);

$Q'_{sup}$ : quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm);

$Q_{arm,i-1}$ : quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm);

$SURLAG$ : coeficiente de atraso do escoamento superficial (hr), e

$t_{conc}$ : tempo de concentração (hr).

O segundo termo do segundo membro da equação representa a fração do total do volume de água que atingirá o canal em um dia. O valor de SURLAG rege tal fração de modo que quanto maior, menos água será mantida armazenada.

### ***Evapotranspiração***

A evapotranspiração potencial é calculada pelo modelo SWAT através de três métodos, são eles: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Necessitando para a sua estimativa de dados médios climáticos mensais. A partir da determinação da evapotranspiração potencial, a real é determinada levando em consideração a demanda

evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, a transpiração dos vegetais e a evaporação do solo.

### ***Sedimentos***

A erosão do solo é estimada no modelo SWAT através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS). A MEUPS é a versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Esta começou a ser implantada no final da década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos. É um modelo empírico, baseado em grandes bases de dados de campo, que estima a erosão distribuída e concentrada com base nos valores de quatro grandes fatores intervenientes no processo erosivo: erosividade climática, erodibilidade dos solos, topografia, e uso e manejo da terra (Ward e Elliot, 1995).

O fator de energia da chuva considerado na EUPS é substituído pelo fator de escoamento superficial na MEUPS. Esta modificação permite estimar a produção de sedimentos em eventos individuais. A estimativa da produção de sedimentos é permitida porque o escoamento superficial é função das condições de umidade antecedente e este fator representa a energia utilizada pela desagregação e transporte de sedimentos.

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada (Williams, 1995) é:

$$sed = 1,18 (Q_{sup} \times q_{pico} \times \text{área}_{URH})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (3.7)$$

No qual:

*sed*: produção de sedimentos após evento de precipitação no dia, em toneladas;

$Q_{sup}$ : escoamento superficial (mm);

$q_{pico}$ : vazão de pico do escoamento (m<sup>3</sup>/s);

$\text{área}_{URH}$ : área da Unidade de Resposta Hidrológica (ha);

*K*: erodibilidade do solo [(0,013ton m<sup>2</sup> hr)/(m<sup>3</sup> ton cm)];

*C*: é o fator de uso e manejo do solo (adimensional);

*LS*: fator topográfico (adimensional);

*P*: fator das práticas conservacionistas (adimensional) e

*CFRG*: fator de fragmentação esparsa (adimensional).

### **Vazão de pico**

A vazão de pico é a vazão máxima que ocorre em um evento de chuva e é considerada um indicador da força erosiva de um evento de chuva sendo usada para determinar a perda de sedimentos. A vazão de pico é estimada pelo Método Racional Modificado, dado pela equação:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{sup} \times A}{3,6 \times t_{conc}} \quad (3.8)$$

Sendo:

$q_{pico}$ : vazão de pico ( $m^3/s$ );

$\alpha_{tc}$ : a fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração da bacia (adimensional);

$Q_{sup}$ : escoamento superficial ( $mm$ );

$A$ : área da sub-bacia ( $km^2$ ) e

$t_{conc}$ : tempo de concentração da sub-bacia (hr).

O método racional assume que a intensidade da chuva  $i$  inicia no tempo  $t = 0$  e continua indefinidamente, a vazão de pico aumentará até o tempo de concentração ( $t = t_{conc}$ ), neste momento todas as sub-bacias estarão contribuindo para a vazão no exutório (Neitsch et al., 2005). O método racional modificado relaciona a vazão de pico com a precipitação diária que atinge o solo durante o  $t_{conc}$  das sub-bacias, o volume de escoamento superficial diário e com o tempo de concentração das sub-bacias.

### **Tempo de concentração**

O tempo de concentração ( $t_{conc}$ ) é o tempo necessário para que a água precipitada no local mais distante da bacia hidrográfica escoe até seu exutório. É determinado pela soma do tempo que a água flui na superfície a partir do ponto mais distante na sub-bacia até atingir um curso d'água com o tempo de percurso no curso d'água até atingir a saída da sub-bacia (Equação (3.9)).

$$t_{conc} = t_{cs} + t_{cc} \quad (3.9)$$

Sendo;

$t_{conc}$ : o tempo de concentração na sub-bacia (hr);

$t_{cs}$ : o tempo de concentração na superfície (hr) e

$t_{cc}$ : o tempo de concentração no curso d'água (hr).

O tempo de concentração na superfície é determinado pela Equação (3.10).

$$t_{cs} = \frac{L_{slp}^{0,6} \times n^{0,6}}{18 \times slp^{0,3}} \quad (3.10)$$

Sendo:

$L_{slp}$ : o comprimento da encosta (m),

$n$ : o coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional) e

$slp$ : a declividade média na sub-bacia (m/m ou %).

O tempo de concentração no curso d'água é calculado pela Equação (3.11).

$$t_{cc} = \frac{0,62 \times L \times n^{0,75}}{A^{0,125} \times slp_{ch}^{0,375}} \quad (3.11)$$

Sendo:

$L$ : o comprimento do curso d'água a partir do ponto mais distante da sub-bacia até o exutório (km),

$n$ : o coeficiente de rugosidade de Manning para o curso d'água (adimensional),

$A$ : a área da sub-bacia (km<sup>2</sup>) e

$slp_{ch}$ : a declividade média no curso d'água (m/m ou %).

### ***Erodibilidade do solo***

O fator de erodibilidade do solo  $K$  representa a susceptibilidade do solo à erosão, sendo a recíproca da sua resistência à erosão. Esse fator está relacionado às propriedades físicas e químicas do solo, representando o grau de erosão de diferentes tipos de solo quando submetidos às mesmas condições de chuva, declive, manejo e práticas conservacionistas (Carvalho, 2008).

Relacionadas às propriedades físicas do solo, Wichmeier e Smith (1978) ressaltam que as que influenciam a erodibilidade pela água são aquelas que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água e as que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento. Sendo assim, o aumento da quantidade de matéria orgânica, a presença de

agregados maiores e a rápida permeabilidade do solo contribuem para a redução da erodibilidade.

Wichmeier e Smith (1978) propuseram uma equação geral para o cálculo do fator de erodibilidade K, considerando um solo com fração de silte inferior a 70%. Williams (1995) propôs uma alternativa à equação supracitada, esta é a equação utilizada no modelo SWAT para a determinação da erodibilidade do solo e é expressa por:

$$K = f_{areia,gr} \times f_{ar-si} \times f_{Corg} \times f_{areia,fn} \quad (3.12)$$

Sendo os fatores da equação:

$f_{areia,gr}$ : representa o conteúdo de areia grossa;

$f_{ar-si}$ : representa a fração do solo que contém argila e silte;

$f_{Corg}$ : contribuição do carbono orgânico e

$f_{areia,fn}$ : representa o conteúdo de areia fina.

Estes fatores são obtidos através das equações:

$$f_{areia,gr} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[ -0,256 \times m_s \times \left( 1 - \frac{m_{silte}}{100} \right) \right] \right\} \quad (3.13)$$

$$f_{ar-si} = \left( \frac{m_{silte}}{m_c + m_{silte}} \right)^{0,3} \quad (3.14)$$

$$f_{Corg} = \left[ 1 - \frac{0,25 \times Corg}{Corg + \exp(3,72 - 2,95 \times Corg)} \right] \quad (3.15)$$

$$f_{areia,fn} = \left\{ 1 - \frac{0,7 \times \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[ 5,51 + 22,9 \times \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right\} \quad (3.16)$$

Sendo:

$m_s$ : percentagem de areia;

$m_{silte}$ : percentagem de silte;

$m_c$ : percentagem de argila e

$Corg$ : fração de carbono orgânico para cada camada do solo.

### **Fator C de uso e manejo do solo**

O fator C de uso e manejo do solo é a taxa de perda de solo durante um determinado estágio da cultura comparada à perda de solo na parcela padrão, durante o mesmo período (Tiwari *et al.*, 2000). Este fator varia de acordo com o tipo e estágio de

desenvolvimento de cada cultura e a influência destes na erosão do solo. Todos estes condicionantes não são avaliados independentemente, devido às diversas interações que ocorrem entre os mesmos.

A cobertura vegetal é um fator condicionante do processo erosivo, Brandt (1986), ressalta que o tipo de vegetação pode atuar de duas maneiras: (a) reduzindo o volume de água que chega ao solo, através da interceptação, e (b) alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva, afetando, com isso, a energia cinética da chuva.

O fator C de uso e manejo do solo pode variar no intervalo numérico de 0 a 1, sendo o limite inferior característico de um solo protegido, ou seja, com susceptibilidade a erosão reduzida, e o limite superior característico de um solo desprovido de cobertura.

### ***Fator Topográfico***

O fator topográfico (LS) é a taxa esperada de perda do solo por unidade de área e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$LS = \left(\frac{L_{slp}}{22,1}\right)^m \times (65,41 \times \text{sen}^2 \alpha_{slp} + 4,56 \times \text{sen} \alpha_{slp} + 0,065) \quad (3.17)$$

Sendo:

$L_{slp}$ : o comprimento da encosta (m),

m: termo exponencial,

$\alpha_{slp}$ : ângulo de declividade da encosta.

O termo exponencial é calculado pela Equação (3.18):

$$m = 0,6[1 - \exp(-35,835 \times slp_{HRU})] \quad (3.18)$$

Sendo:

$slp_{HRU}$ : declividade da HRU (m/m).

### ***Práticas Conservacionistas***

Representa o efeito das práticas conservacionistas, tais como plantio em nível, terraceamento e plantio em faixas, na erosão do solo (Lane et al., 1992). O fator P está intimamente relacionado com os diferentes tipos de uso e manejo do solo.

Tais práticas mudam o padrão, grau e direção do fluxo e conseqüentemente as taxas de erosão. Logo, áreas que não apresentem tais práticas, proporcionam a erosão sem obstáculos, e o fator tem valor igual a 1.

### ***Fator de fragmentação esparsa***

Este fator considera o afloramento de rocha na área, através da equação:

$$CFRG = \exp^{-0,053 \times rochas} \quad (3.19)$$

O termo “rochas” representa a fração da área de afloramento rochoso.

### ***Crescimento vegetal***

As condições de cobertura vegetal e de resíduos das culturas são essenciais para a estimativa do desprendimento e transporte de partículas do solo. O SWAT estima diariamente o crescimento de plantas pela aplicação de uma versão simplificada do modelo de crescimento de planta EPIC (Williams, 1995). Este modelo utiliza os conceitos de desenvolvimento fenológico da planta com base na unidade de calor acumulada diariamente (graus dias), do índice de colheita e do potencial de biomassa e do ajustamento do estresse devido a água e temperatura. O SWAT simula o crescimento de culturas anuais e perenes.

### ***Manejo agrícola***

A principal meta da modelagem ambiental é avaliar o impacto das atividades humanas em certo sistema. O centro desta avaliação está na pontualização das práticas de manejo do solo e da água que são exercidas dentro de certo sistema. O componente manejo agrícola fornece sub-modelos que simulam plantio, colheita, aplicações de irrigação, nutrientes e pesticidas e operações de cultivo.

### Percolação

O processo de percolação no modelo SWAT é calculado através da propagação do escoamento combinado com um modelo de fluxo em fendas no solo para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez que a água percolou abaixo da zona de raízes, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno a jusante do ponto considerado.

A quantidade de água que percola para a próxima camada é calculada pela equação:

$$w_{per,cam} = SW_{cam,excesso} \left( 1 - \exp\left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}}\right] \right) \quad (3.20)$$

Sendo,

$w_{per,cam}$ : quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm);

$\Delta T$ : duração do intervalo de tempo (hr), e

$TT_{perc}$ : tempo de percolação entre as camadas (hr).

O tempo de percolação entre as camadas é dado por:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (3.21)$$

Sendo,

$SAT_{cam}$ : a quantidade de água no solo completamente saturado (mm)

$FC_{cam}$ : a quantidade de água na capacidade de campo (mm).e

$K_{sat}$ : a condutividade hidráulica saturada (mm/hr).

### Evaporação da água no solo

A evaporação da água existente no solo ocorre de acordo com a profundidade da camada e a quantidade de água disponível, e é determinada pela Equação (3.22):

$$E_{solo,z} = E_z'' \times \frac{z}{[z + \exp(2,374 - 0,00713 \times z)]} \quad (3.22)$$

Sendo:

$E_{solo,z}$ : a demanda evaporativa (mm) na profundidade z;

$E_z''$ : a evaporação máxima do solo para o dia (mm) e

z: é a profundidade do solo (mm).

A quantidade da demanda evaporativa de uma camada do solo é determinada tomando a diferença entre a evaporação das camadas entre os limites superiores e inferiores do solo, impossibilitando a compensação da evaporação entre diferentes camadas, ou seja, a demanda evaporativa não atingida por uma camada de solo resulta em uma redução real da evapotranspiração para a Unidade de Resposta Hidrológica.

A estimativa da distribuição da evaporação pode ser melhorada a partir da incorporação no modelo do coeficiente de compensação da evaporação do solo (ESCO). Este coeficiente rege a extração de demanda evaporativa das camadas inferiores do solo, de modo que quanto menor seu valor mais será retirado de profundidades maiores do solo (Figura 3.23).

$$W_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta T}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (3.23)$$

Sendo:

$W_{perc,cam}$ : quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm);

$SW_{cam,excesso}$ : quantidade de água disponível para percolar no dia (mm);

$\Delta T$ : duração do intervalo de tempo (hr), e

$TT_{perc}$ : tempo de percolação entre as camadas (hr).

O volume de água disponível para percolação  $SW_{cam,excesso}$ , na camada do solo é calculado:

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} = FC_{cam} \quad \text{se} \quad SW_{cam} > FC_{cam} \quad (3.24)$$

$$SW_{cam,exce} \quad \text{se} \quad SW_{cam} \leq FC_{cam} \quad (3.25)$$

Sendo:

$SW_{cam}$ : quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm) e

$FC_{cam}$ : quantidade de água na capacidade de campo (mm).

O tempo de propagação em cada camada do solo é calculado através da equação:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (3.26)$$

Sendo:

$SAT_{cam}$ : quantidade de água no solo completamente saturado (mm), e

$K_{sat}$ : condutividade hidráulica saturada (mm/hr).

### **Processo de REVAP**

Se não houver ascensão através das franjas capilares, o volume de água que percola no solo irá recarregar os aquíferos raso e profundo. No caso da recarga no aquífero raso, o mesmo é estimado pela equação:

$$aq_{rs,i} = aq_{rs,i-1} + W_{rec,rs} - Q_{aq} - W_{REVAP} - W_{bomba,rs} \quad (3.27)$$

Sendo:

$aq_{rs,i}$ : quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia "i" (mm);

$aq_{rs,i-1}$ : quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia "i-1" (mm);

$W_{rec,rs}$ : quantidade de água que recarrega o aquífero raso no dia (mm);

$Q_{aq}$ : escoamento subterrâneo que recarrega o canal principal (mm);

$W_{REVAP}$ : quantidade de água que ascende por franjas capilares (mm); e

$W_{bomba,rs}$ : quantidade de água retirada através de bombas (mm).

O processo de REVAP considera o volume de água que ascende através das franjas capilares em função da demanda de evapotranspiração, porém o mesmo não é considerado no volume evapotranspirado. A quantidade máxima de água que será retirado do aquífero por meio de REVAP em um determinado dia é:

$$W_{REVAP,mx} = \beta_{rev} \times E_0 \quad (3.28)$$

Sendo:

$W_{revap,mx}$ : máxima quantidade de água (mm) que ascende em resposta ao déficit hídrico;

$\beta_{rev}$ : coeficiente de REVAP (adimensional), e

$E_0$ : potencial de evapotranspiração (mm) daquele dia.

A quantidade de água, a qual efetivamente passa por tal processo é determinada pelas seguintes condições:

1.  $W_{REVAP} = 0$  se  $aq_{rs} \leq aq_{lim,rv}$
2.  $W_{REVAP} = W_{REVAP,mx} - aq_{lim,rv}$  se  $aq_{lim,rv} < aq_{rs} < (aq_{lim,rv} + W_{REVAP,mx})$
3.  $W_{REVAP} = W_{REVAP,mx}$  se  $aq_{lim,rv} \geq (aq_{lim,rv} + W_{REVAP,mx})$

(3.29)

Sendo:

$W_{REVAP}$ : quantidade de água que ascende (mm);

$aq_{rs}$ : quantidade de água armazenada no aquífero raso (mm), e

$aq_{lim,r}$ : valor limite do nível de água a ser superado para ocorrer o processo REVAP (mm).

Este processo é muito significativo em bacias hidrográficas onde a zona saturada está localizada próxima a superfície e as raízes das plantas são muito profundas. O REVAP ocorre apenas quando a quantidade de água armazenada no aquífero raso excede um valor limite especificado pelo usuário.

### 3.2.2 Fase da água no ciclo hidrológico

A fase da água no ciclo hidrológico pode ser definida como a propagação ou movimento da água e sedimentos através da rede de canais da bacia hidrográfica até seu exutório.

#### *Propagação da vazão líquida no canal e cálculo do fluxo de sedimentos no canal*

A propagação da água através da rede de canais é realizada através do método de armazenamento variável proposto por Williams (1969), este método é uma variação do método da onda cinemática.

A vazão e velocidade são calculadas através da equação de Manning e o tempo de propagação é calculado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade, considerando o canal como sendo de seção trapezoidal. O fluxo a partir do canal é também ajustado para a perda por transmissão, evaporação e fluxo de retorno (Arnold et al., 1998).

Considerando a equação da continuidade o volume armazenado em um trecho para um determinado intervalo de tempo é dado por:

$$V_{arm} = V_{ent} - V_{saída} \quad (3.30)$$

Sendo:

$V_{arm}$ : o volume armazenado no trecho ( $m^3$ ),

$V_{ent}$ : volume de entrada no trecho ( $m^3$ ), e

$V_{saída}$ : volume de saída no trecho ( $m^3$ ).

O volume de água que sai do segmento em um determinado intervalo de tempo é calculado considerando um coeficiente de armazenamento, através da equação:

$$V_{saída,2} = SC(V_{ent} - V_{arm,1}) \quad (3.31)$$

Sendo:

$V_{saída,2}$ : volume que sai do trecho no fim do intervalo de tempo ( $m^3$ );

SC: coeficiente de armazenamento (adimensional);

$V_{ent}$ : volume de água que entra no início do intervalo de tempo ( $m^3$ ), e

$V_{arm,1}$ : volume armazenado no início do intervalo de tempo ( $m^3$ ).

O coeficiente de armazenamento é calculado pela expressão:

$$SC = \left( \frac{2 \times \Delta T}{2 \times TT + \Delta T} \right) \quad (3.32)$$

Sendo:

$\Delta T$ : intervalo de tempo (s) e

TT: tempo de viagem (s)

O tempo de viagem é calculado através da razão constante entre o volume armazenado e o fluxo de saída.

O transporte de sedimentos na rede de canais consiste em dois processos que ocorrem simultaneamente: deposição e degradação. O componente de deposição é baseado na velocidade de queda e o componente de degradação tem como base o conceito de força do escoamento definido por Bagnold (1977). Este definiu a força do escoamento como um produto da densidade da água, da taxa de escoamento e da declividade da superfície da água.

A quantidade máxima que pode ser transportada pelo fluxo em determinado trecho é dada por:

$$conc_{sed,mx} = c_{sp} \times V_{pc}^{sp \ exp} \quad (3.33)$$

Sendo:

$conc_{sed,mx}$ : concentração máxima de sedimentos que pode ser transportada pela água ( $t/m^3$  ou  $kg/L$ );

$V_{pc}$ : velocidade de pico (m/s) e

$c_{sp}$  e  $sp$ : coeficientes de ajuste, variando entre 0,0001 a 0,01 e entre 1 a 2, respectivamente.

A concentração máxima de sedimentos é comparada com a concentração de sedimentos existente no início de cada intervalo de tempo. No caso da concentração no início do intervalo de tempo ser superior a máxima, tem-se o processo de deposição predominando e estimado por:

$$sed_{dep} = (conc_{sed,0} - conc_{sed,mx})V_{pc} \quad (3.34)$$

Sendo:

$sed_{dep}$ : quantidade de sedimentos depositada (ton), e

$conc_{sed,0}$ : concentração de sedimentos no início do intervalo de tempo (kg/L) ou (ton/m<sup>3</sup>).

Quando a concentração atual é inferior a máxima possível, a erosão é o processo que domina sendo estimada por:

$$sed_{ero} = (conc_{sed,mx} - conc_{sed,0})V_{pc} \times K_{ca} \times C_{ca} \quad (3.35)$$

Sendo:

$sed_{ero}$ : quantidade de sedimentos que é erodida (ton);

$K_{ca}$ : fator de erodibilidade do canal (cm/hr.Pa) e,

$C_{ca}$ : fator de cobertura do canal (adimensional).

O fator de erodibilidade do canal segue a mesma premissa do fator referente ao solo, sendo comumente inferior em uma ordem de magnitude deste último. Enquanto que o fator de cobertura do canal busca estimar a proteção do leito devido a existência de vegetação.

Uma vez que são calculadas a quantidade de sedimentos que deposita e erode, tem-se a estimativa final das partículas existentes no trecho,  $sed_{at}$  (ton), através da equação:

$$sed_{at} = sed_{sed,0} - sed_{dep} + sed_{ero} \quad (3.36)$$

Por fim, a quantidade de sedimento que sai do trecho do canal é estimada com uso da seguinte equação:

$$sed_{out} = sed_{at} \frac{V_{saida}}{V_{ca}} \quad (3.37)$$

Sendo:

$sed_{out}$ : concentração de sedimentos que sai do trecho (ton),

$V_{out}$ : volume que sai no intervalo de tempo ( $m^3$ ) e

$V_{ca}$ : volume de água no trecho ( $m^3$ ).

### 3.3 Aplicações do modelo SWAT

O SWAT é um modelo que gradualmente vem ampliando suas fronteiras no ambiente científico, pois possui um perfil de modelagem que engloba diversos componentes hidrológicos e agrônômicos, tornando-o um modelo versátil para auxiliar órgãos públicos na tomada de decisão diante de situações conflitantes do uso do solo que resultam em intensos processos erosivos (Santhi *et al.*, 2003; Chu *et al.*, 2005).

Van Liew e Garbrecht (2003) avaliaram o comportamento do modelo SWAT para simular o escoamento superficial em três sub-bacias do Sudoeste de Oklahoma (EUA), considerando diferentes condições climáticas (normais, com deficiência e com excesso hídrico). Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de simular de forma adequada o escoamento superficial em apenas uma sub-bacia, sendo necessária a calibração de parâmetros nas outras sub-bacias nas condições de clima normal e com deficiência hídrica. Porém, para as condições de excesso hídrico, o escoamento superficial foi simulado de forma inadequada nas três sub-bacias

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

Betrie *et al.*, (2011) aplicaram o modelo SWAT na região superior da bacia do rio Nilo Azul com o intuito de avaliar a distribuição espacial da produção de sedimentos e avaliar o impacto das diferentes mecanismos e métodos de mitigação da erosão do solo na região através da simulação de cenários de uso e manejo conservacionista da

bacia, sendo um deles por exemplo de reflorestamento. Os resultados da simulação do cenário de condições existente mostraram uma similaridade entre as concentrações diárias de sedimentos observados e simulados, como indicado pelo coeficiente de Nash Sutcliffe superior a 0,83. Os resultados para a simulação dos cenários de manejos mostraram uma redução da produção de sedimentos atuais nas sub-bacias, sendo que o cenário de reflorestamento apresentou os melhores resultados.

O modelo SWAT também permite avaliar as diferentes práticas de manejo do solo, Arabi et al. (2008) avaliaram os impactos na produção de sedimentos, escoamento superficial e carga de nutrientes e pesticidas de diferentes práticas de manejo do solo na agricultura e técnicas de cobertura para os canais em uma pequena bacia agrícola (7,3 km<sup>2</sup>) localizada na região nordeste de Indiana (EUA). Os resultados obtidos apontam a sensibilidade do modelo aos diferentes manejos, possibilitando a determinação de práticas conservacionistas para as bacias hidrográficas.

A sensibilidade de diversos parâmetros às respostas do modelo SWAT foi objeto de estudo de inúmeras pesquisas. O importante trabalho de Cibir et al., (2010) analisou a sensibilidade dos parâmetros que influenciam na geração de fluxo no modelo SWAT para diferentes cenários climáticos, escalas temporais e regimes de fluxo. Os parâmetros analisados pelos autores estão relacionados aos processos de escoamento superficial, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e rugosidade da superfície. Os resultados do estudo mostraram uma variação significativa do fluxo modelado em diferentes cenários climáticos, sendo possível avaliar a sensibilidade dos parâmetros influentes. Foi verificado também que alguns parâmetros foram sensíveis a variação de escala, apresentando respostas variadas às diferentes áreas da bacia.

Green e Griensven (2008) avaliaram a eficácia dos procedimentos de auto-calibração e análise de sensibilidade incorporados ao modelo SWAT em bacias hidrográficas de pequena escala. Com relação ao procedimento de análise de sensibilidade os resultados apresentaram uma variabilidade entre as sub-bacias estudadas, sendo o parâmetro relativo à Curva Número (CN<sub>2</sub>) e o coeficiente de evapotranspiração do solo (ESCO) de grande importância na simulação do escoamento e consequentemente na produção de sedimentos.

O modelo SWAT já foi aplicado também em muitas bacias hidrográficas brasileiras para os mais diversos fins. Baldissera (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo para a simulação de vazões líquidas mensais nas condições da Bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, onde as médias mensais simuladas de vazão líquida foram

comparadas com uma série de quatro anos de dados observados em cinco postos fluviométricos. O modelo também foi calibrado para dois cenários: o primeiro para a fase de enchimento da represa da APM Manso e o segundo simulando a bacia com cobertura potencialmente natural.

A simulação da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial, bem como a simulação de cenários alternativos de uso e manejo do solo na microbacia hidrográfica do Ribeirão Martins constituiu o objetivo do trabalho realizado por Moro (2005). Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois os dados simulados acompanharam os dados observados. Já a simulação de cenários permitiu reconhecer na bacia as áreas sensíveis aos processos erosivos, onde seriam necessárias práticas de controle da erosão ou mudanças na cobertura do solo. Cabe também ressaltar que Moro (2005) verificou que a vegetação nativa protege significativamente contra os processos erosivos na bacia.

Schultz et al. (2011) simularam a produção e o transporte diário de sedimentos na bacia do Altíssimo Rio Negro, localizada entre os Estados do Paraná e Santa Catarina. O modelo apresentou bons resultados com relação à simulação da produção e transporte de sedimentos diários e mensais. A análise por sub-bacia permitiu verificar que as áreas com maior produção de sedimentos eram também as áreas com maior ocorrência de escoamento superficial.

Visando investigar a aplicabilidade do modelo SWAT na microbacia de Arvorezinha, Rio Grande do Sul, Uzeika (2009) verificou o desempenho do modelo na simulação de dados hidrológicos e sedimentológicos, sem utilizar nenhuma forma de calibração. Uzeika (2009) também simulou possíveis cenários futuros com o intuito de obter uma compreensão global dos efeitos da implementação das práticas de conservação dos solos sobre os processos hidrossedimentológicos. Os resultados obtidos na simulação de cenários apontam a sensibilidade do modelo às modificações no uso e manejo do solo, porém, não foi adequado para simular a produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais.

O trabalho de Carvalho Neto (2011) foi pioneiro na aplicação do modelo SWAT para uma bacia hidrográfica localizada no semiárido nordestino. O autor utilizou dois diferentes MDEs nas simulações: um gerado a partir da interpolação de dados de campo e outro obtido através de sensoriamento remoto. A parametrização e validação do modelo foram realizadas em nível de sub-bacias, apontando um bom desempenho do modelo, conforme valores obtidos para  $R^2$  e coeficiente de Nash-Sutcliffe. A simulação

de cenários foi realizada para a Bacia do Riacho dos Namorados, na situação atual de uso do solo, com e sem a presença dos açudes. Nesse estudo, também foram simulados quatro cenários de mudanças na cobertura do solo da bacia, nos quais a bacia poderia estar com: (a) vegetação nativa, (b) reflorestada com algaroba, (c) com a monocultura de milho e (d) totalmente desmatada. As simulações permitiram avaliar a influência dos açudes e constatar que o reflorestamento com algaroba protegeria a bacia melhor do que a vegetação nativa e, a cultura de milho é apenas ligeiramente melhor que o solo nu em termos de erosão.

Lopes (2008) analisou a produção de sedimentos e escoamento em sete microbacias experimentais localizadas na região norte do Estado de Santa Catarina com o modelo SWAT. O modelo gerou dados simulados que acompanharam os dados observados de vazão, com valores médios nas funções objetivo e nas correlações. A partir das simulações foi possível conhecer as sub-bacias que produziram maior quantidade de água e de sedimentos. Foi verificada também a limitação do modelo SWAT para pequenas bacias, devido à perda de sensibilidade na resposta da bacia e ao grande número de parâmetros necessários para calibração.

Bonumá et al., (2011) avaliaram o balanço hídrico e a sua relação com a produção de sedimentos na bacia hidrográfica rural do Arroio Lino. Também foram avaliados quais os parâmetros eram mais sensíveis na simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos. Os autores observaram que a simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos tiveram um desempenho melhor a nível mensal em relação ao diário. Um dos motivos apontados para o desempenho insatisfatório do modelo na simulação da produção de sedimentos a nível diário foi devido ao processo de calibração dos parâmetros relativos a este processo ter sido feita de forma interativa em relação à calibração dos componentes hidrológicos.

Com relação à sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT, Bonumá et al., (2011) analisaram 32 parâmetros do modelo SWAT e mostraram que o parâmetro relativo à Curva Número (CN2), o coeficiente de evapotranspiração do solo (ESCO) e o fator alfa do fluxo de base (Alpha\_Bf) possuem grande importância na simulação do escoamento e produção de sedimentos.

Ferrigo et al. (2011) analisaram especialmente os processos hidrossedimentológicos na bacia do Córrego Capão Comprido (Distrito Federal) com base na aplicação do modelo SWAT. As simulações geradas mostraram a tendência observada

de redução de vida útil do lago pela sedimentação que, por sua vez, pode ser acelerada pelos usos do solo.

Blainski et al. (2011) avaliaram o desempenho do modelo hidrológico SWAT e do modelo atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting*) e desenvolveram um sistema de previsão hidrológica diária, baseado no acoplamento desses modelos, para a bacia hidrográfica do rio Araranguá, Santa Catarina, possibilitando a previsão de vazão dos rios, em diferentes pontos, com um horizonte de 48 horas.

## CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

---

A Bacia Representativa de Sumé (BRS), localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro é a área de estudo escolhida para este trabalho. A ferramenta utilizada para modelar os processos hidrossedimentológicos nesta bacia é o modelo SWAT; suas equações já foram descritas no capítulo anterior. Logo, neste capítulo serão apresentadas as características físico-climáticas dessa região e os dados geoespaciais necessários para aplicação do modelo SWAT, assim como o seu processo de funcionamento e a metodologia adotada neste trabalho.

### 4.1 Área de estudo

#### 4.1.1 Breve histórico

A necessidade de estudos hidrológicos no Nordeste brasileiro contribuiu para a instalação nesta região de bacias representativas. Segundo Nouvellot (1974), é necessário estudar uma bacia que deva representar uma região ou zona hidrológicamente homogênea, assumindo que exista uma zona físico-climática homogênea correspondente a uma zona hidrológica teoricamente homogênea.

Neste contexto, a Bacia Representativa de Sumé é denominada “representativa” devido ao fato de seu solo, relevo, vegetação e clima serem semelhantes aos encontrados em uma grande área do Nordeste do Brasil (Cadier e Freitas, 1982).

Os estudos na Bacia Representativa de Sumé foram iniciados pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) no começo da década de 1970 (Cadier e Freitas, 1982). A sua concepção foi muito importante para o conhecimento das relações hidrológicas básicas da região. Inserida na Bacia Representativa de Sumé se encontra a Bacia Experimental de Sumé, instalada em 1981 com o objetivo de obter um melhor entendimento dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem no semi-árido nordestino.

No ano de 1982 foi firmado um acordo entre a SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste) e a UFCG (antiga UFPB - campus II) para incluir a pesquisa dentro do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (PDCT/NE), financiado pelo CNPq e pelo Banco Interamericano de

Desenvolvimento (BID). A campanha de 1983 ainda foi realizada pela SUDENE, com a integração da equipe da Área de Recursos Hídricos da UFCG, que assumiu a condução da pesquisa em 1984 (Lopes, 2003).

Análises preliminares dos dados obtidos nos primeiros anos de pesquisa realizada na BRS foram feitas por Cadier e Freitas (1982) e Cadier et al. (1983), com o intuito de evidenciar tendências no comportamento dos processos de escoamento superficial e erosão do solo.

Com o intuito de analisar as características físicas da Bacia Representativa e Experimental de Sumé, Figueiredo (1998b) discute técnicas para a estimativa de parâmetros físicos do solo com base em informações como textura, número de dias secos antecedentes ao evento, a intensidade e duração do evento entre outros. A partir da análise comparativa de valores observados, concluiu-se que as metodologias analisadas são aplicáveis, fazendo-se necessário, no entanto, maiores investigações utilizando-se modelos de base física.

Lopes (2003) analisou o efeito de escala sobre os parâmetros de dois modelos hidrossedimentológicos aplicados nas sub-bacias da Bacia Representativa de Sumé, os modelos utilizados foram o Kineros2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) e WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*). Os resultados mostraram que os parâmetros principais do modelo Kineros2, o parâmetro relativo ao potencial efetivo de capilaridade e o parâmetro relativo à erosão por impacto das gotas de chuva, sofrem efeito de escala.

Souza (2007) desenvolveu e validou um modelo de base física para a simulação do escoamento e erosão do solo. O modelo desenvolvido foi o MODFIPE (Modelo Distribuído de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão do Solo). Nesse trabalho uma das bacias utilizadas como área de estudo foi a Bacia Representativa de Sumé.

#### 4.1.2 Localização

Na parte superior da bacia do rio Paraíba, Estado da Paraíba, está localizada a Bacia Representativa de Sumé (BRS), entre os municípios de Sumé e Monteiro com referência geográfica de 7°40' latitude Sul e 37°00' longitude Oeste (Cadier e Freitas, 1982). A BRS ocupa uma área de aproximadamente 138,0 km<sup>2</sup>, subdividida em três sub-bacias: Jatobá, Umburana e Gangorra, sendo que, as duas primeiras são sub-bacias da bacia de Gangorra (Figura 4.1 e 4.2).

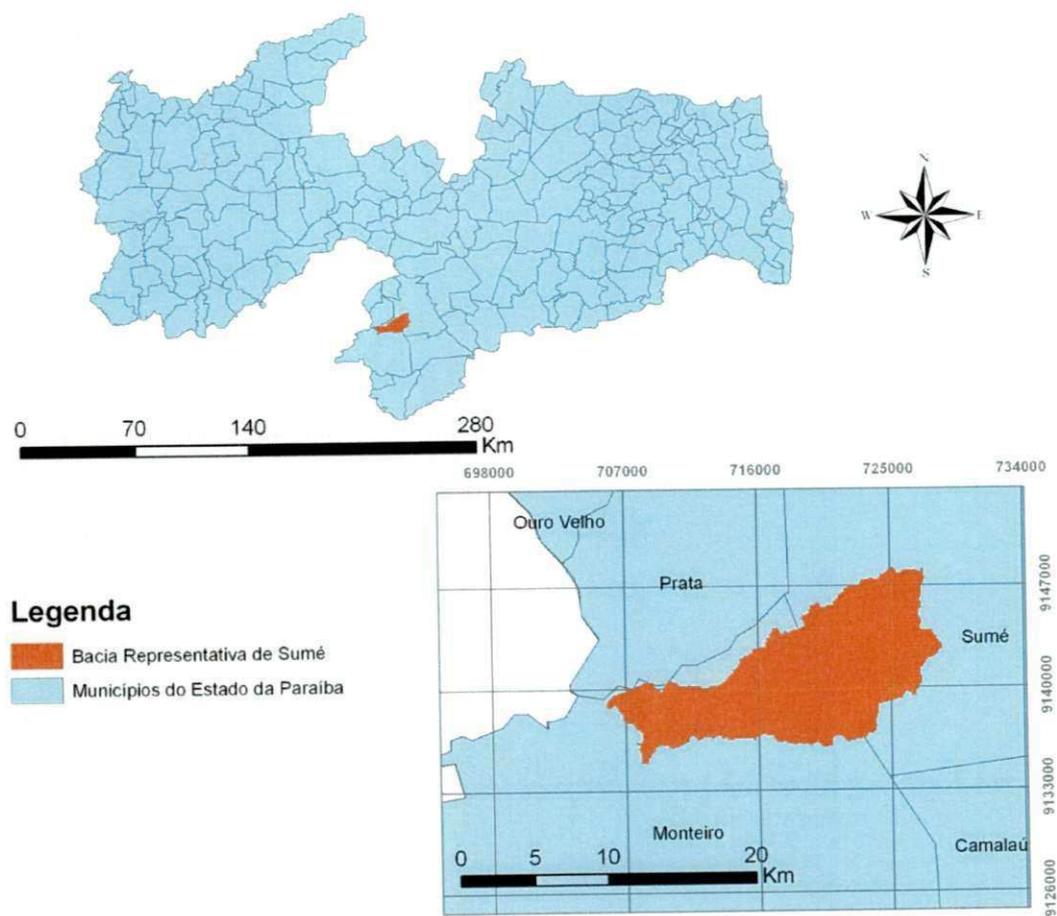


Figura 4.1 - Localização da Bacia Representativa de Sumé no Estado da Paraíba

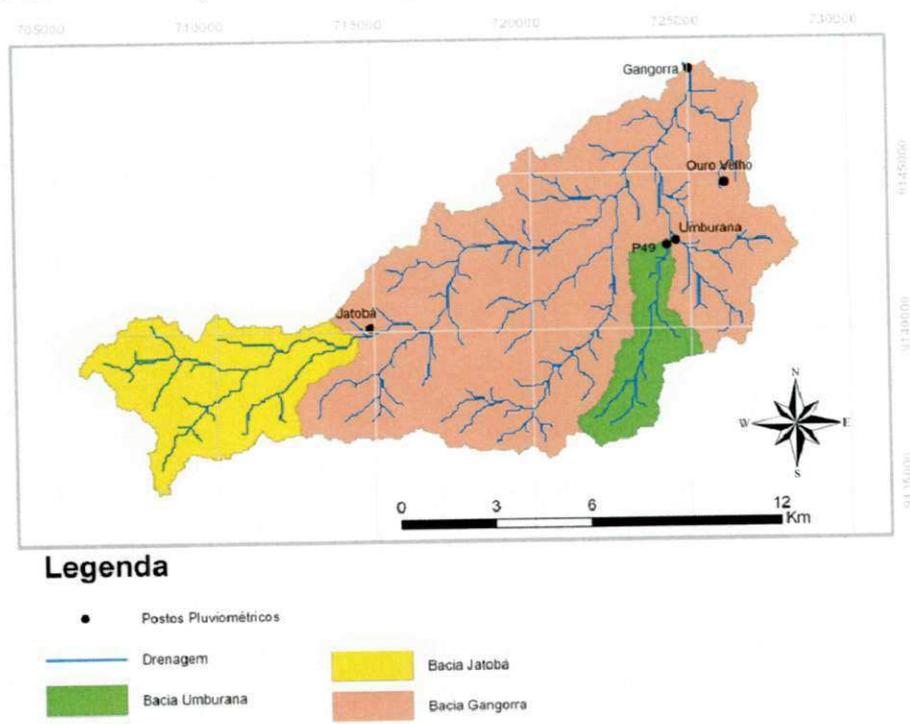


Figura 4.2 - Rede de drenagem e localização das sub-bacias e postos pluviométricos da BRS

### 4.1.3 Características Físico-Climáticas

#### **Clima**

A Bacia Representativa de Sumé está localizada numa região de clima semiárido, caracterizada principalmente pela irregularidade das precipitações, temperaturas elevadas e existência de duas estações nitidamente distintas: a estação de seca, que se estende de junho a janeiro e a estação chuvosa que se reduz praticamente aos quatro meses restantes. A precipitação média anual varia entre 550 e 600 mm, com decenal seca igual a 300 mm e decenal úmida igual a 900 mm (Cadier e Freitas, 1982).

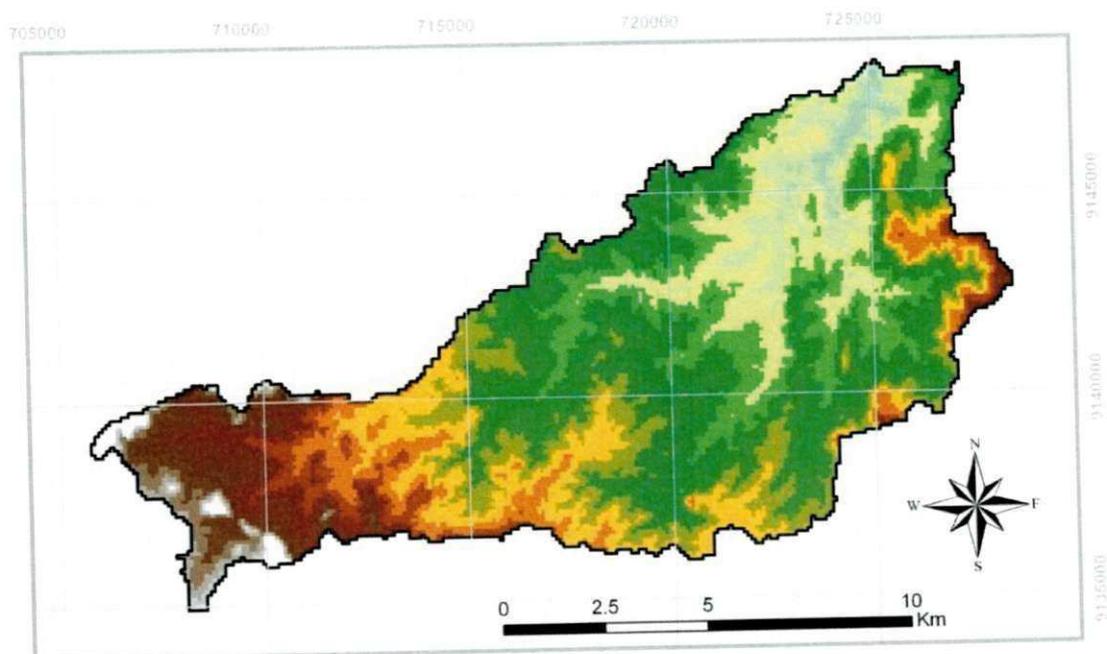
A temperatura média anual varia entre 23 e 27°C com amplitudes térmicas diárias de 10°C. A insolação apresenta uma média anual igual a 2800 horas enquanto que a evapotranspiração média é de 2000 mm/ano. A evaporação anual no Tanque Classe A é igual a 2900 mm (Lopes, 2003).

#### **Geologia**

As rochas são cristalinas e fazem parte do embasamento de idade pré-cambriano, com cerca de 20% de granitos alcalinos que dão origem aos solos Cambissolo Háplico Tbs, 60% de xistos, paranfibólitos e gnaiss onde se desenvolvem sobretudo os solos bruno não-cálcicos e 20% de gnaiss e quartzitos onde se desenvolvem os solos litólicos. Estes três tipos de rochas são caracterizados pela ausência de aquíferos generalizados, com exceção de algumas fendas e zonas Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico localizadas e de pouca espessura (Cadier e Freitas, 1982).

#### **Relevo e pedologia**

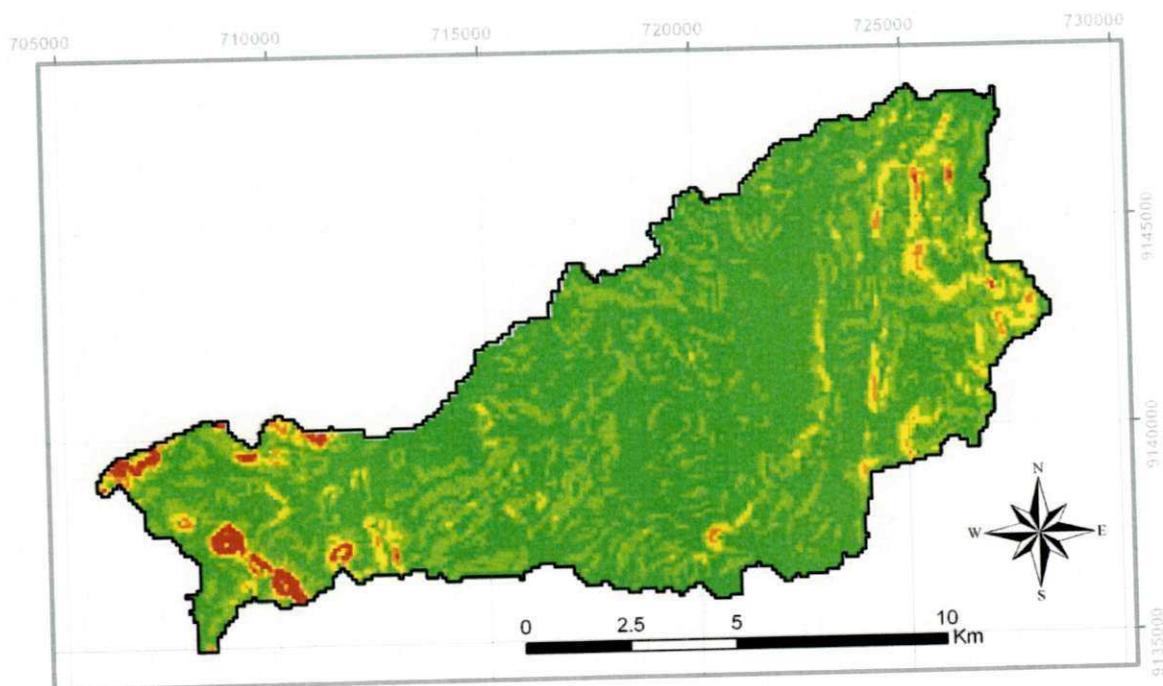
O relevo varia de ondulado a pouco ondulado, com altitude variando entre 536 e 794 m como pode ser observado na Figura 4.3 e no mapa da distribuição das declividades na Bacia Representativa de Sumé da Figura 4.4.



**Legenda**  
Elevação (m)

538 - 540	571 - 580	611 - 620	651 - 660	691 - 700
541 - 550	581 - 590	621 - 630	661 - 670	701 - 710
551 - 560	591 - 600	631 - 640	671 - 680	711 - 720
561 - 570	601 - 610	641 - 650	681 - 690	721 - 730

Figura 4.3 - Mapa de relevo da Bacia Representativa de Sumé



**Legenda**

0 a 4%	4 a 8%	8 a 12%	12 a 16%	Superior a 16%
--------	--------	---------	----------	----------------

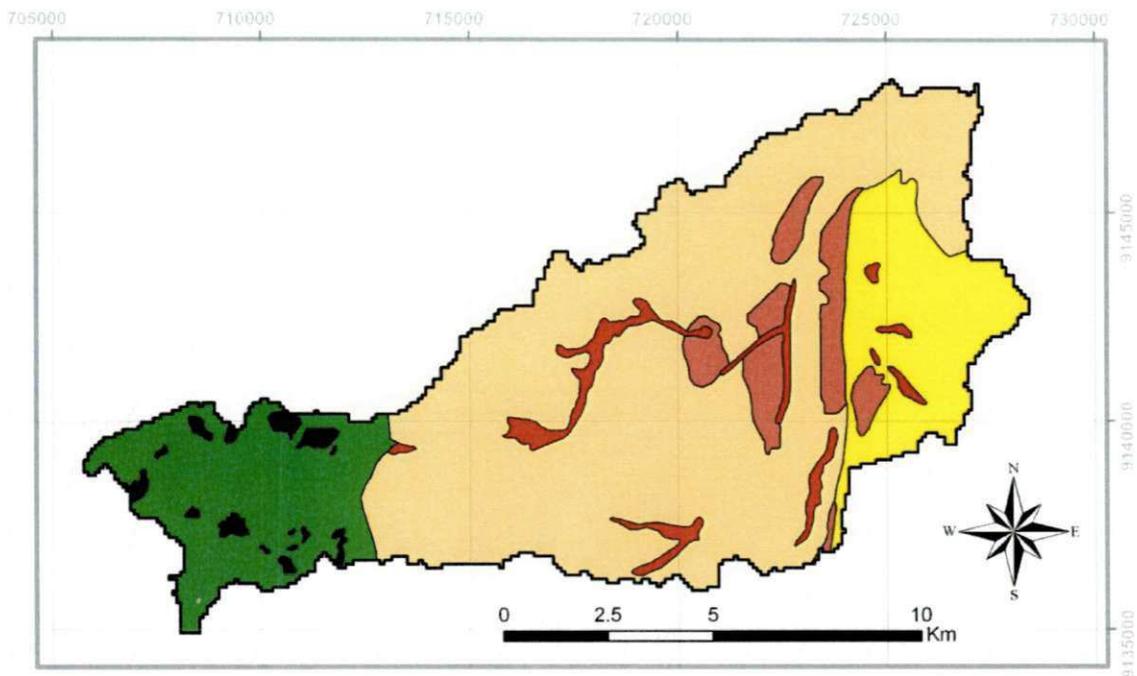
Figura 4.4- Mapa da distribuição das declividades na BRS

A pedologia predominante encontrada na bacia é apresentada por Cadier e Freitas (1982) (Figura 4.5) em seu relatório. A classificação dos solos apresentada pelos autores corresponde aos perfis descritos no Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972). O trabalho de Campos (2006) reclassificou os perfis descritos no Levantamento Exploratório utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Neste trabalho será utilizada a reclassificação proposta pela EMBRAPA (1999) e a correspondência entre esta e a nomenclatura antiga para os solos predominantes na BRS está apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classificação antiga e nova para os solos existentes na BRS

Classificação Anterior (Brasil, 1972)	Perfil (Brasil,1972)	Nova Classificação (EMBRAPA, 1999)	Símbolo (EMBRAPA, 1999)
Bruno não-cálcicos litólico	27	Luvissole Hipocrômico Órtico típico	TPo
Bruno não-cálcico vérticos	31	Luvissole Crômico Órtico típico	TCo
Litólicos eutróficos	48	Neossolo Litólico Eutrófico típico	RLe
Aluviais	47	Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico	RUve
Podzólicos	16	Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico	CXbe

De acordo com Cadier e Freitas (1982), os solos Luvissole Hipocrômico Órtico típico são pouco espessos, pedregosos, com permeabilidade moderada; os solos Luvissole Crômico Órtico típico são um pouco mais profundos que o primeiro. Os solos Neossolo Litólico Eutrófico típico são rasos, pedregosos, de permeabilidade média a lenta; os solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico são geralmente profundos, com permeabilidade muito rápida, textura arenosa e se apresentam normalmente nas partes planas da bacia e os solos Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico possuem profundidade média superior a 1,5 m, com permeabilidade rápida devido à textura média ou franco arenosa.



### Legenda

	Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico		Luvisolo Crômico Órtico típico
	Luvisolo Hipocrômico Órtico típico		Neossolo Litólico Eutrófico típico
	Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico		Afloramento de rochas

Figura 4.5 - Mapa pedológico da Bacia Representativa de Sumé (Fonte: Adaptado de Cadier e Freitas, 1982)

### Vegetação

A caatinga corresponde a cobertura vegetal da região semi-árida do Nordeste brasileiro, tipo singular de vegetação xerófila tropical, somente encontrada nesta região. É vegetação tortuosa, espinhenta, de folhas pequenas e caducas, constituída por arbustos e árvores de pequeno porte sobre um estrato herbáceo, geralmente não gramíneo. É rica em cactáceas, bromeliáceas, euforbiáceas e leguminosas, porém é pobre em gramíneas. Esta vegetação apresenta alta resistência à seca devido a diferentes mecanismos anatomo-fisiológicos (Pereira, 2008).

Entre as espécies mais significativas, tem-se o Xiquexique (*Cereus Gounellei*), Mandacaru (*Cereus Jamacaru*), Braúna (*Schinopsis Brasiliensis*), Favela (*Jatropha Phillacantha*), Quixaba (*Bumelia Sertorum*), Aroeira (*Astonium Urundeva*), Umbuzeiro (*Ipodias Tuberosa*), Pinhão (*Jatropha Curcas*), Macambira (*Bromélia Laciniosa*),

Marmeleiro (*Cróton Hemyargyreus*) e Caatingueira (*Caesalpinia Pyramidalis*) (Cadier e Freitas, 1982).

A agricultura predominante é a de subsistência, principalmente o cultivo de milho e feijão em áreas de solos podzólicos, em outras áreas estes cultivos são praticamente desprezíveis do ponto de vista quantitativo.

#### 4.2 Descrição dos dados de entrada do modelo

A utilização do modelo SWAT é iniciada através da inserção de inúmeros dados relacionados às características físico-climática da bacia. A caracterização do meio físico da bacia hidrográfica é condição necessária para a realização de estudos hidrológicos.

Os dados de entrada no modelo SWAT correspondem aos planos de informação cartográficos (PIs) e aos dados alfanuméricos (Figura 4.6).

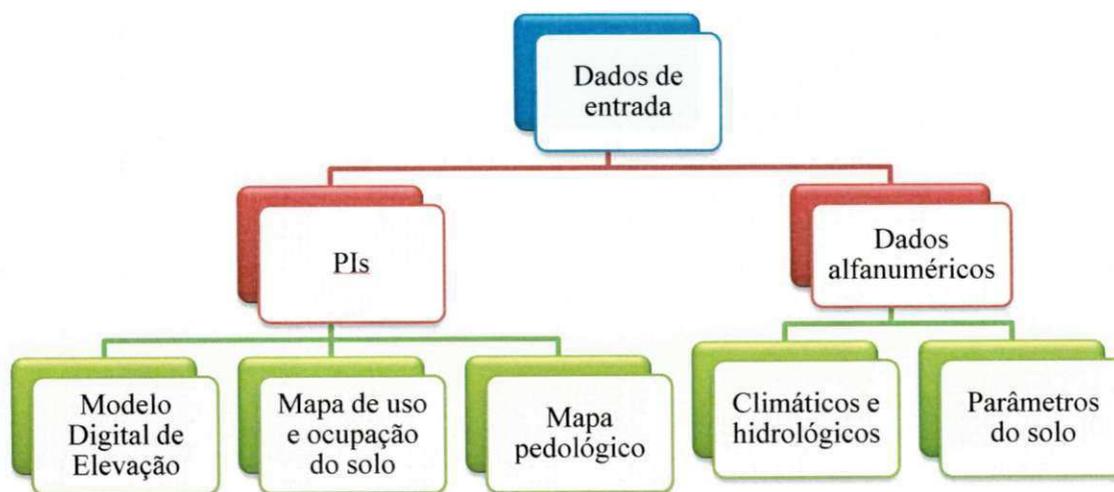


Figura 4.6 - Dados de entrada no modelo SWAT

##### 4.2.1 Modelo Digital de Elevação

A delimitação de uma bacia hidrográfica pode ser feita de forma automática, a partir dos modelos Digitais de Elevação. Segundo Felgueiras (1998) um Modelo

Numérico de Terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma' região da superfície terrestre.

Foi utilizado um MDE gerado pelo projeto TOPODATA (Valeriano, 2004), que oferece dados topográficos e suas derivações básicas em cobertura nacional, ora elaborados a partir dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), refinados para a resolução espacial de 30m através da técnica de “krigagem”.

#### 4.2.2 *Uso e ocupação do solo*

A partir da investigação visual detalhada e a classificação supervisionada de uma cena do satélite LANDSAT 5 (órbita 215, ponto 65, sensor TM) com data de passagem de 17 de junho de 1984 identificou-se as principais classes de ocupação e uso do solo para a área de estudo, de acordo com metodologia utilizada no trabalho de Almeida (2011). O mapa produzido é considerado foto-interpretativo e o software utilizado para a classificação foi o SPRING desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Esta imagem foi escolhida por apresentar baixa cobertura de nuvens na área de estudo e referir-se o mais próximo possível ao período de simulação deste trabalho. Quando as sombras e nuvens estavam presentes, mesmo em números pequenos, elas foram no MDE representadas pelas condições de uso e ocupação do solo do seu entorno. As áreas classificadas como lagoas também sofreram esta mesma adaptação, quando as lagoas foram ignoradas. Todas essas adaptações foram realizadas no software SPRING (Figura 4.7).

Para adaptar-se ao banco de dados presente na interface do modelo SWAT, fez-se uma analogia da classe vegetação nativa, nesta região representada pela caatinga, com uma vegetação semelhante a “Range Brush”, uma espécie de vegetação presente na região do Texas, EUA.

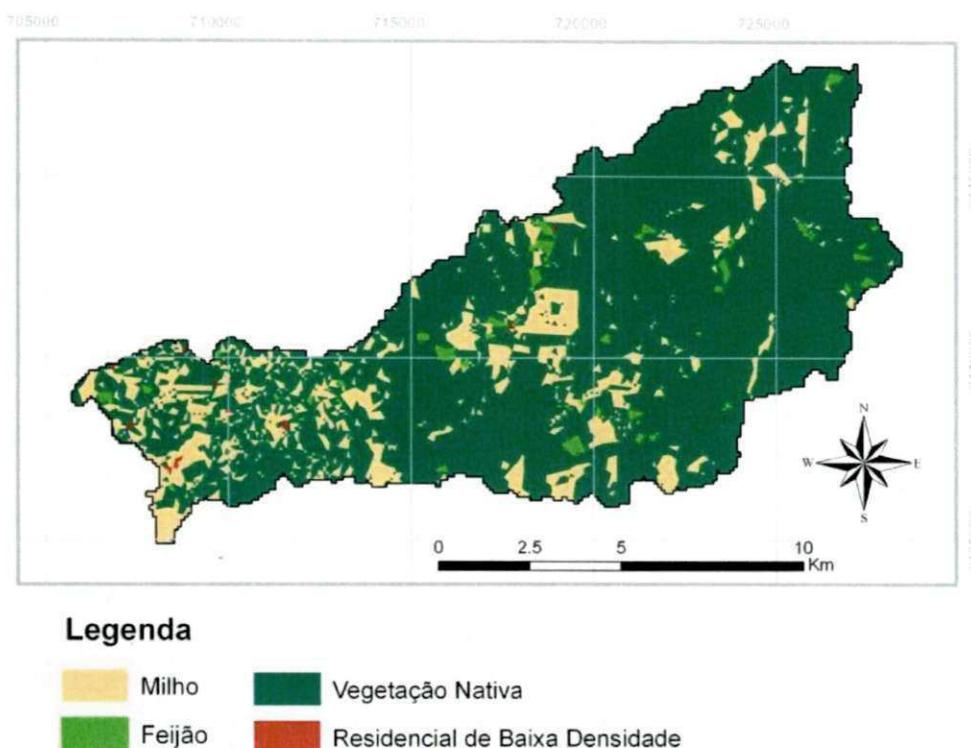


Figura 4.7 - Mapa de uso e ocupação do solo da BRS.

#### 4.2.3 Pedologia

O mapa de solo foi digitalizado a partir de material físico disponível no relatório de Cadier e Freitas (1982) e transformado no formato shapefile (Figura 4.5).

O modelo SWAT possui em sua interface ArcSWAT um banco de dados com as características físico-hídricas dos solos dos Estados Unidos, desta forma, a este banco de dados foi possível adicionar as classes de solos presentes na Bacia Representativa de Sumé e seus respectivos parâmetros.

Os parâmetros de solo necessários referem-se ao grupo de saturação (HYDGRP), a profundidade de raiz (SOL\_ZMX), porosidade (ANION\_EXCL), profundidade da camada (SOL\_Z), densidade aparente (SOL\_BD), água disponível no solo (SOL\_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL\_K), erodibilidade (USLE\_K), albedo (SOL\_ALB), carbono orgânico (SOL\_CBN) e percentagem de argila, silte, areia e seixo.

A condutividade hidráulica saturada para as manchas de solos da BRS foram determinadas por Lopes (2003), no processo de calibração com o modelo Kineros2, sendo: 3,5 mm/h para o solo Luvisolo Crômico Órtico típico; 4,5 mm/h para o solo Neossolo Litólico Eutrófico típico; 10 mm/h para o solo Cambissolo Háplico Tb; 3,7

mm/h para Luvisolo Hipocrômico Órtico típico e 60 mm/h para os solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico.

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

- Grupo hidrológico A - solos com alta taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada  $> 150$  mm/hr, solos constituídos de areias grossas e excessivamente drenados, estes solos têm alta taxa de transmissão de água;
- Grupo hidrológico B – solos com moderada taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 5 e 150 mm/h, solos constituídos de sedimentos moderadamente grossos a moderadamente finos, estes solos têm moderada taxa de transmissão de água;
- Grupo hidrológico C – solos com baixa taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada entre 1 e 5 mm/hr, com textura moderadamente fina a fina, que impedem o movimento de água nos horizontes, estes solos têm baixa transmissão de água;
- Grupo hidrológico D – solos com baixíssima taxa de infiltração, condutividade hidráulica satura menor que 1 mm/h, são solos potencialmente argilosos com altíssimo escoamento potencial, estes solos têm baixíssima taxa de transmissão de água.

A definição do grupo hidrológico associado à pedologia da bacia foi estabelecida de acordo com os valores de condutividade hidráulica saturada estabelecida por Lopes (2003) supracitados. Desta forma, os solos Luvisolo Hipocrômico Órtico típico, Luvisolo Crômico Órtico típico, Neossolo Litólico Eutrófico típico e Cambissolo Háplico Tb foram inseridos no grupo hidrológico C e os solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico no grupo hidrológico B.

A porosidade foi determinada por Rawls e Saxton (1982) com valor de 0,398. Devido à representatividade da BRS adotaram-se os valores de densidade aparente e de albedo utilizados por Carvalho Neto (2011), sendo  $1,65 \text{ g/cm}^3$  e 0,17 respectivamente, para todas as classes de solo. A profundidade da raiz foi estabelecida como sendo a profundidade da última camada de cada solo.

A quantidade e profundidade das camadas, a percentagem de carbono orgânico, bem como, a textura de cada classe e camada de solo foram determinadas a partir do Levantamento Exploratório e Reconhecimento de Solos da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972) e pode ser verificada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros do solo distintos para cada camada

		Tipo de solo				
		TPo	CXbe	TCo	RLe	RUve
1ª camada	SOL_Z (mm)	220	20	40	300	150
	USLE-K	0,17765	0,15843	0,15061	0,16090	0,18930
	SOL-CBN (%)	0,6	0,94	1,36	0,83	1,9
	Argila (%)	13	14	14	15	41
	Silte (%)	34	22	33	22	50
	Areia (%)	53	64	53	63	9
2ª camada	SOL_Z (mm)	230	600	140	-	250
	USLE-K	0,12133	0,15843	0,16345	-	0,20790
	SOL-CBN (%)	0,54	0,27	0,63	-	0,6
	Argila (%)	57	19	21	-	45
	Silte (%)	14	18	26	-	44
	Areia (%)	29	63	53	-	11
3ª camada	SOL_Z (mm)	-	700	320	-	350
	USLE-K	-	0,16106	0,14750	-	0,14948
	SOL-CBN (%)	-	0,18	0,25	-	0,12
	Argila (%)	-	16	40	-	20
	Silte (%)	-	18	23	-	14
	Areia (%)	-	66	37	-	66
4ª camada	SOL_Z (mm)	-	-	-	-	450
	USLE-K	-	-	-	-	0,15455
	SOL-CBN (%)	-	-	-	-	0,30
	Argila (%)	-	-	-	-	50
	Silte (%)	-	-	-	-	30
	Areia (%)	-	-	-	-	20

**Legenda:** SOL\_Z: Profundidade da camada, USLE-K: Erodibilidade, SOL-CBN: Carbono Orgânico, TPo: Luvisolo Hipocrômico Órtico típico, TCo: Luvisolo Crômico Órtico típico, RLe: Neossolo Litólico Eutrófico típico, RUve: Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico, CXbe: Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico.

Determinadas as texturas das camadas de solo, foi possível definir os valores de erodibilidade para os diferentes tipos de solo, utilizando a equação proposta por Williams (1995), descrita por Baldisserra (2005), estes valores encontram-se na Tabela-4.2.

A capacidade de água no solo pode também ser considerada a quantidade de água disponível para as plantas, para a sua determinação, primeiramente é estabelecida a

classe textural do solo segundo a classificação desenvolvida pelo U.S Department of Agriculture e pelo U.S Soil Conservation Service, dos Estados Unidos (Figura 4.8).

O diagrama triangular é subdividido dentro de vários tipos de classificação textural de solo, com cada tipo de solos compreendendo uma série de porcentagens dos três tipos de partícula (areia, silte e argila). A classificação do solo é determinada plotando as porcentagens de cada uma das três classes de partícula de solo no diagrama triangular. O ponto de interseção de cada uma destas três porcentagens de classe de partícula indicará tipos de classificação de solo, como mostra o Triângulo de Classificação Textural.

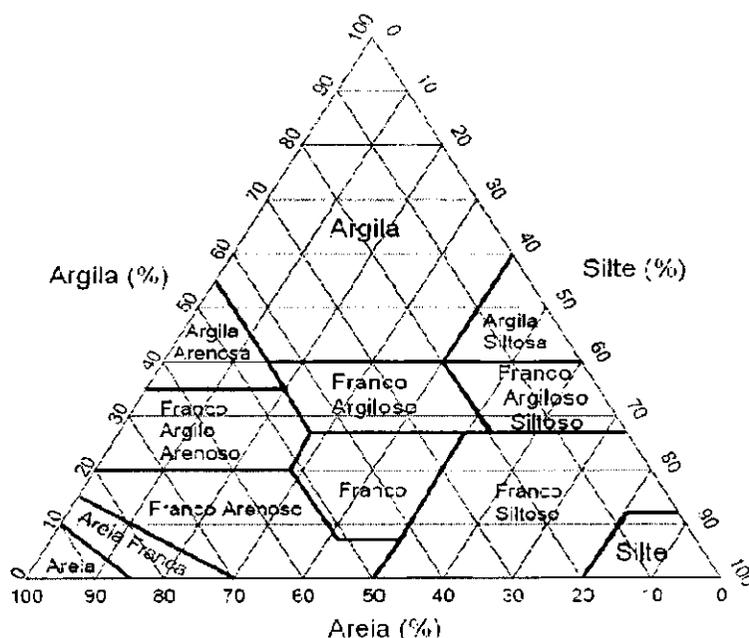


Figura 4.8 - Triângulo de classificação textural do solo (Fonte: Brady, 1989)

Os solos Luvisolo Hipocrômico Órtico típico, Luvisolo Crômico Órtico típico, Neossolo Litólico Eutrófico típico e Cambissolo Háptico Tb foram classificados como franco argilo arenosos e os solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico como areia franca. Após a definição da classe textural do solo pode-se correlacioná-la com a proposta de Salter e Williams (1967 e 1969) apud Baldisserra (2005), Tabela 4.3, desta forma foi possível encontrar a capacidade de água disponível no solo com valores de 0,150 mm/mm para o Luvisolo Hipocrômico Órtico típico, Luvisolo Crômico Órtico típico, Neossolo Litólico Eutrófico típico e Cambissolo Háptico Tb e 0,158 mm/mm para os solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico.

Tabela 4.3 - Classificação Textural e capacidade de água disponível no solo (Fonte: Salter e Williams , 1967 e 1969 apud Baldissera, 2005)

Classe Textural	Capacidade de água disponível (mm/mm)
Areia	0,150
Areia Franca	0,158
Franco Arenoso	0,175
Franco	0,175
Franco Siltoso	0,192
Franco Argilo Arenoso	0,150
Franco Argiloso	0,183
Franco Argilo Siltoso	0,192
Argila Arenosa	0,142
Argila Siltosa	0,183
Argila	0,175

#### 4.2.4 Dados Climatológicos

O modelo SWAT necessita de dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Devido à ausência de dados diários de temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, estes foram gerados pelo SWAT, utilizando o gerador climático WXGEN (Sharpley e Williams, 1990), tendo como referência os dados mensais da estação climatológica de Ouro Velho. Os dados diários de pluviometria foram obtidos de quatro estações pluviométricas, são elas: Umburana, Jatobá e Gangorra e a P49, sendo que os dados dos três primeiros foram utilizados no processo de calibração do modelo e correspondem ao período de 1976 a 1979, estes dados foram adquiridos do relatório de Cadier e Freitas (1982); já os dados do posto P49 foram utilizados no processo de simulação de cenários, correspondem ao período de 1982 a 1991, estes se encontram em Srinivasan e Galvão (2003). A Figura 4.2 apresenta a localização dos postos pluviométricos, e a Tabela 4.4 a localização de todas as estações supracitadas.

Tabela 4.4 - Localização das estações

<b>Estação</b>	<b>XPR (m)</b>	<b>YPR (m)</b>	<b>Elevação (m)</b>
Ouro Velho	726100	9144640	590
Umburana	724559	9142804	<b>564</b>
Jatobá	714892	9140084	<b>600</b>
Gangorra	725045	9148333	<b>550</b>
P49	724265	9142666	<b>576</b>

Os dados mensais necessários para o gerador climático são médias e desvios históricos da área de estudo. Deve-se ressaltar que as estimativas de dados de precipitação foram calculadas através do programa *pcpSTAT* desenvolvido por Liersch (2003a) e a temperatura do ponto de orvalho utilizando o programa *dew* também desenvolvido por Liersch (2003b).

A precipitação máxima em meia hora foi definida após encontrar os maiores valores de precipitação para cada mês do período de dados e, em seguida, foram utilizados os fatores para desagregação propostos por Oliveira et al (2000) por serem os mais próximos encontrados da área de estudo. A Tabela 4.5 apresenta os dados climáticos que caracterizam a área de estudo.

O modelo oferece três opções para estimativa da evapotranspiração potencial: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith, este foi o utilizado neste estudo.

Os dados de lâmina escoada para a Bacia Representativa de Sumé e as sub-bacias de Umburana e Jatobá foram adquiridos do relatório de Cadier e Freitas (1982), bem como os eventos individuais. A Tabela 4.6 descreve as cheias individuais e apresenta o valor total da chuva e do escoamento superficial para cada evento. Todos estes dados foram utilizados para a calibração e verificação da consistência do modelo e correspondem ao período de 1976 a 1979.

Tabela 4.5 - Dados climáticos mensais

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCP_MM	39,9	107,6	181,2	131,0	99,1	31,4	32,7	1,1	4,7	15,8	11,2	33,8
PCPSTD	6,47	9,69	12,99	13,92	8,66	2,87	2,93	0,23	0,87	3,42	1,56	3,85
PCPSKW	7,47	3,36	2,75	5,26	4,09	3,79	3,93	7,43	5,86	7,55	4,82	4,09
PRW1	0,08	0,15	0,25	0,26	0,28	0,20	0,20	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08
PRW2	0,31	0,55	0,53	0,39	0,55	0,34	0,39	0,00	0,00	0,29	0,33	0,47
PCPD	3	8	11	9	12	7	8	1	1	2	2	4
TMPMX	33,33	32,27	31,40	30,67	29,22	28,88	28,82	31,00	31,43	32,62	32,98	33,02
TMPMN	17,52	17,08	17,33	16,42	15,92	14,42	12,53	12,22	13,73	15,90	17,43	17,17
TMPSTDMX	3,93	8,00	13,14	10,03	7,91	3,24	3,42	2,87	2,19	2,89	1,82	2,83
TMPSTDMN	0,66	1,10	0,52	1,46	1,39	1,53	3,28	2,33	2,14	1,76	1,25	1,75
WNDVAV	1,57	1,13	0,89	0,87	1,13	12,39	1,00	1,37	2,08	2,01	2,21	1,83
RAINHHMX	21,83	19,38	17,72	40,00	19,35	6,45	6,48	0,74	2,30	9,96	3,83	8,18
SOLARV	38,39	38,74	37,91	35,55	32,71	31,05	31,62	33,98	36,57	38,08	38,27	38,05
DEWPT	24,57	24,65	24,93	24,69	24,45	23,49	22,93	22,76	23,20	23,43	23,85	24,19

**Legenda:** PCPMM: Precipitação média mensal (mm); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação (mm); PR\_W1: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%); PR\_W2: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%); PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima; PCPD: Número de dias de precipitação (dias); TMPMX: Temperatura máxima (°C); TMPMN: Temperatura mínima (°C); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C); TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C); WNDVAV: Velocidade do vento (m/s); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 hora (mm); SOLARV: Radiação solar (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); e DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho (°C).

Tabela 4.6 - Precipitação e lâmina escoada nas bacias da BRS

Nº da cheia	Data	Bacia	P (mm)	L <sub>o</sub> (mm)
1	30/04 a 01/05/1977	Umburana	112,9	68,00
9	06/03 a 07/03/1978	Umburana	37,0	11,40
11	11/03 a 12/03/1978	Umburana	50,0	6,11
11	15/03 a 16/03/1978	Jatobá	13,8	2,41
16	27/03 a 28/03/1979	Jatobá	73,0	7,09
6	31/03 a 01/04/1976	Gangorra	62,0	4,68
7	22/01 a 23/01/1977	Gangorra	57,7	1,17
13	01/05 a 02/05/1977	Gangorra	32,1	7,02

### 4.3 Processo de funcionamento do modelo

A aplicação do modelo SWAT é realizada a partir da inserção dos dados geoespaciais e formação do banco de dados climatológico e pedológico, os dados de entrada do modelo foram descritos na seção anterior.

A inserção dos planos de informação cartográficos e dos dados alfanuméricos no modelo ArcSWAT ocorre via interface apropriada. A partir da inserção do MDE se obtém a rede de drenagem e é possível realizar a delimitação e discretização da bacia em sub-bacias. Já a sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), estas por sua vez, possuem uma única combinação dos mapas e classes supracitados. No modelo SWAT um processo só poderá ser executado se o seu antecessor for realizado com sucesso. O processo de funcionamento do modelo pode ser visto na Figura 4.9.

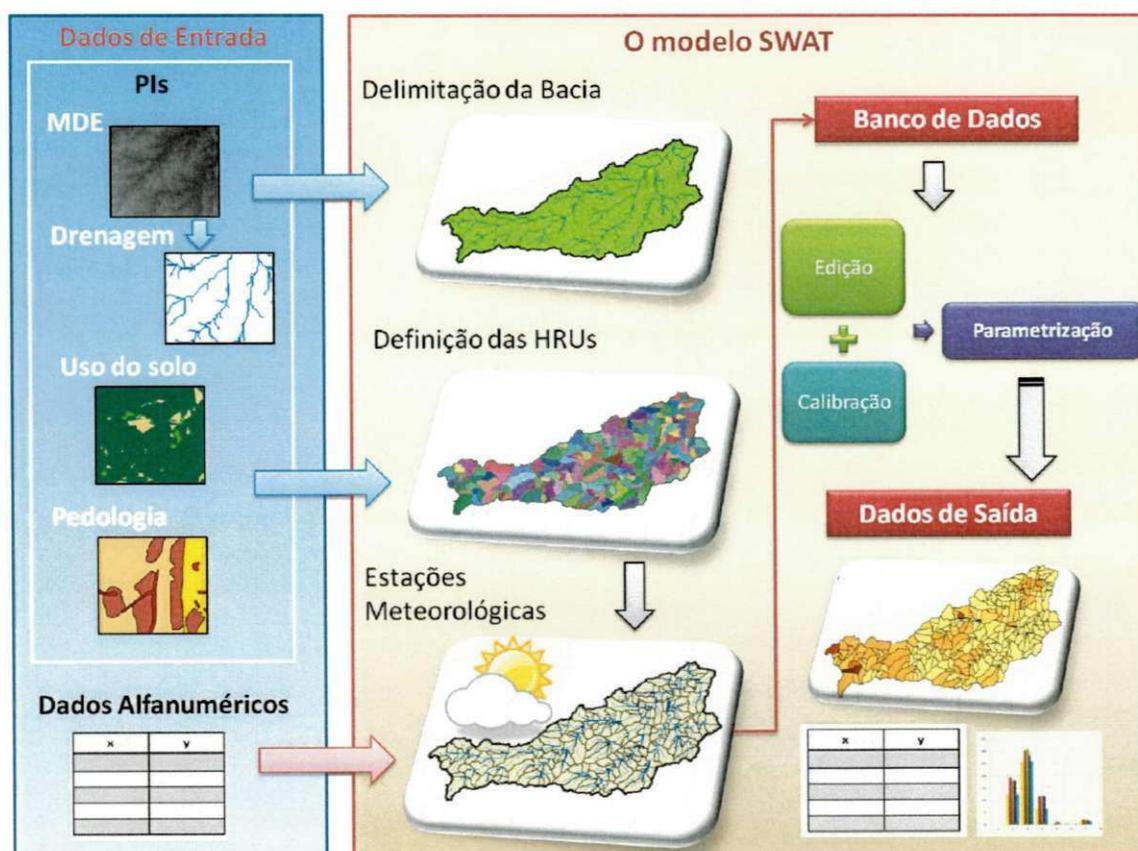


Figura 4.9 - Processo de funcionamento do modelo SWAT

#### 4.3.1 Delimitação e discretização da bacia

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

A área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal é definida pelo usuário, este parâmetro define a quantidade de sub-bacias no processo de discretização. Jha et al., (2004) ressalta que há uma sensibilidade do modelo à discretização da bacia hidrográfica, de modo que, uma maior quantidade de sub-bacias resulta em uma maior eficiência do modelo. Desta forma, foi utilizado para a formação das sub-bacias o valor correspondente a 8% da área da bacia delimitada pelo modelo para a área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal.

Para a discretização em sub-bacias o modelo insere de forma automática os pontos de confluência da rede hidrográfica que são os exutórios das sub-bacias, desta forma, a cada sub-bacia é associada um curso de água.

#### 4.3.2 Unidades de Resposta Hidrológica

A sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), estas por sua vez, possuem uma única combinação dos mapas e classes supracitados. No modelo SWAT há a possibilidade de escolher como se dará a distribuição das HRUs nas sub-bacias como mostra a Figura 4.10.

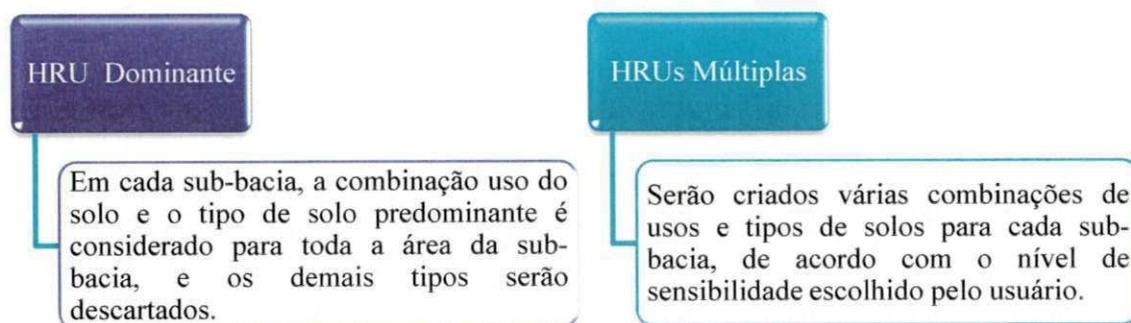


Figura 4.10 – Alternativas para definição das HRUs

Nesse trabalho, a opção de múltiplas HRUs foi escolhida com o intuito de evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo e aos tipos de solos para as sub-bacias. Desta forma, estabeleceu-se como 15% da área da sub-bacia o limite mínimo da área para o uso da terra, solo e declividade para a formação das HRUs. Foram utilizados cinco intervalos de declividade, o máximo permitido pelo modelo, são elas: 0 a 4%, 4 a 6%, 6 a 8%, 8 a 10% e acima de 10%.

O modelo SWAT aplica a MUSLE em cada HRU e o somatório do aporte de sedimentos gerado pelas HRUs que compõem uma sub-bacia é o aporte de sedimentos total da mesma. Após realizar a transferência dos sedimentos gerados na sub-bacia para o canal, inicia-se a propagação destes para fora da bacia hidrográfica, sendo neste estudo considerada como produção de sedimentos, a descarga sólida que passa pelo ponto de controle selecionado (exutório).

#### 4.3.3 *Período de aquecimento do modelo*

O período de aquecimento tem a finalidade de estabilizar o modelo durante seus processos iterativos iniciais para a obtenção dos resultados. As incertezas no resultado do modelo nas condições iniciais são minimizadas através da utilização deste período que permite reduzir os eventuais erros nestas condições (Wagner et al., 2004).

Assim como Carvalho Neto (2011), foi adotado neste trabalho um período de aquecimento para o modelo de três anos. Porém, devido à reduzida quantidade de dados (quatro anos) duplicou-se os três primeiros anos da série, servindo estes para aquecimento e provimento de estabilidade para as condições iniciais do modelo.

## 4.4 **Parametrização do modelo**

### 4.4.1 *O processo de parametrização*

Nesta etapa os parâmetros do modelo são ajustados, de forma a se obter a melhor aproximação possível com os dados observados em campo. A calibração do modelo SWAT é realizada em quatro etapas: balanço da água e escoamento, sedimentos, nutrientes e pesticidas. Neste estudo apenas os parâmetros relacionados com o processo de escoamento superficial foram calibrados para a BRS e para os dados de sedimentos foi analisada a consistência dos resultados simulados pelo modelo.

A parametrização é a fase da simulação do modelo onde os parâmetros devem ser determinados e a validação é a simulação do modelo com os parâmetros estimados, onde se verifica a validade do ajuste realizado (Tucci, 2005). No período de calibração, as entradas do modelo são variadas até que um ajuste aceitável é obtido; em seguida o modelo é rodado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste é determinado (Arnold et al., 2000).

A calibração e validação do modelo dependem da disponibilidade de dados históricos, medições de amostras e determinação das características físicas do sistema. Para a parametrização de um modelo deve-se separar uma série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e outro para validação. Porém, neste estudo, devido à reduzida série de dados, toda ela foi utilizada para a calibração do modelo. Em seguida, foi verificada a consistência dos parâmetros estimados nas sub-bacias da BRS; para estas há uma série de dados medidos que correspondem ao período dos dados utilizados na calibração.

Sendo assim, neste trabalho não foi realizada uma validação do modelo através da simulação de uma diferente série de dados medidos, mas verificada a consistência dos parâmetros (estimados na BRS), usando os dados observados nas sub-bacias de Umburana e Jatobá.

#### 4.4.2 *Parâmetros adotados*

A fim de representar da melhor forma possível a área de estudo, os parâmetros que governam a quantidade de água que recarrega os aquíferos foram ajustados. Diante da inexistência de aquíferos, este processo foi levado ao mínimo possível, pois como destaca Carvalho Neto (2011), a ascensão pela franja capilar de toda a água que adentra a zona vadosa, antes que seja possível a recarga subterrânea, pode ser consumida pelos vegetais e/ou estar disponível para evaporação do solo através do processo REVAP (este processo foi descrito no capítulo III).

Os parâmetros relacionados a este processo que foram modificados são: (a) ALPHA\_BF que é o fator do fluxo de base que determina o número de dias para que o fluxo subterrâneo atinja o canal, foi adotado para este parâmetro o valor 0 anulando assim a recarga de base; (b) GW\_REVAP que trata-se do coeficiente de “REVAP”, foi adotado o seu valor máximo de 0,2 promovendo desta forma, uma ascensão de água conforme a evapotranspiração potencial; (c) REVAPMN, este parâmetro trabalha com o

valor limite a ser superado pela lâmina que percola para favorecer o processo de “REVAP”, adotou-se portanto o valor 0 indicando que toda a água que percola está passível do processo “REVAP”; e (d) RCHRG\_DP que é a fração do que percola e abastecerá o aquífero subterrâneo profundo, para este parâmetro foi adotado o valor 0.

O coeficiente de Manning para os canais foi adotado de acordo com os estudos de Figueiredo (1998b) nesta mesma área como sendo 0,033, tanto para o canal principal quanto para os tributários, que corresponde, segundo Porto (2006), ao coeficiente de rugosidade de Manning para rios com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos, com vegetação e pedras em condições muito boas.

#### 4.4.3 Parâmetros calibrados

Fixados os parâmetros supracitados, as variáveis utilizadas na calibração foram ajustadas até que a lâmina escoada calculada pelo modelo se aproximasse da lâmina escoada observada em campo.

A determinação das variáveis utilizadas na calibração fundamentou-se nos trabalhos de diversos pesquisadores (Baldissera, 2005; Cibin et al., 2010 e Machado et al., 2003) e estão apresentadas a seguir:

- ESCO: coeficiente de compensação da evaporação do solo, podendo variar entre 0,001 e 1;
- SOL\_AWC: água disponível no solo (SOL\_AWC), com valores máximos e mínimos de 0 a 1 mm /mm respectivamente;
- CN<sub>2</sub>: valor de curva número da umidade na condição II;
- SURLAG: coeficiente de retardo do escoamento, podendo variar no intervalo de 1 a 24 dias;
- LAT\_TIME: tempo de retorno do fluxo lateral variando no intervalo de 0 a 180 dias; e
- SOL\_K: condutividade hidráulica saturada assume os valores de 0 a 2000 mm/h.

Os valores de condutividade hidráulica saturada só foram calibrados para os solos Cambissolo Háplico Tbs e aluviões, os demais solos já se encontravam com valores bem definidos na literatura e em seu limite.

Foi necessário também um ajuste no intervalo de classes de declividade, com o intuito de melhor representar a área estudada e o processo de escoamento superficial.

Desta forma, as cinco classes de declividade adotadas tiveram seus intervalos modificados para: 0 a 4%, 4 a 8%, 8 a 12%, 12 a 16% e acima de 16%.

#### 4.4.4 Índices de ajuste

Na etapa de calibração, além da verificação visual do ajuste, foram utilizados índices de ajuste para analisar a relação entre os dados, são eles: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), este coeficiente é dado pela equação:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (4.1)$$

Sendo:

$COE$ : coeficiente de Nash-Sutcliffe;

$E_m$ : evento observado;

$E_s$ : evento simulado;

$\bar{E}$ : média do evento observado e

$n$ : número de eventos.

De acordo com Zhang et al. (2007) e Legates e McCabe (1999), o valor de COE indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, podendo variar de  $-\infty$  a 1. Gotschalk et al. (1999) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente:  $COE = 1$  corresponde a um ajuste perfeito;  $COE > 0,75$  o modelo é considerado adequado e bom;  $0,36 < COE < 0,75$  o modelo é considerado aceitável; entretanto, segundo Zappa (2002), valores de COE acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação.

## 4.5 Verificação da consistência do modelo

A consistência dos resultados apresentados pelo modelo foi verificada através da simulação nas sub-bacias de Jatobá e Umburana, para estas há uma série de vazões mensais observadas descritas no relatório de Cadier e Freitas (1982) para o mesmo período trabalhado na BRS, logo uma comparação com os valores calculados pelo modelo pode ser realizada.

Nesta etapa, apesar do período de simulação ser o mesmo utilizado na fase de calibração, a verificação da consistência dos parâmetros estimados anteriormente foi analisada a partir da simulação nas sub-bacias, nas quais os dados calculados de escoamento superficial foram comparados aos observados com o intuito de verificar se o modelo representa bem o sistema em determinadas porções da bacia.

Utilizou-se dados de oito eventos individuais de escoamento superficial e precipitação, três para Gangorra, três para Umburana e dois para a sub-bacia de Jatobá, a fim de averiguar a consistência do modelo parametrizado quanto à simulação diária do escoamento superficial e da produção de sedimentos. Estes dados estão descritos na Tabela 4.6.

A consistência dos resultados nesta etapa foi analisada em termos do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), descritos no item anterior. A análise visual da similaridade entre os processos de precipitação, escoamento superficial e aporte de sedimentos também foi recurso utilizado para verificar a consistência do modelo, através de gráficos, tabelas e mapas.

Os processos de delimitação, discretização e definição das HRUs foram os mesmos utilizados na Bacia Representativa de Sumé, bem como os mapas de uso e ocupação do solo e pedológico, já que se referem ao mesmo período de simulação.

#### **4.6 Simulação de cenários**

Dentre as vantagens da utilização de modelos matemáticos, uma das mais importantes refere-se à elaboração de cenários, ou seja, a possibilidade de alterar as configurações dos parâmetros de entrada do modelo no intuito de gerar novos conjuntos de condições virtuais, as quais permitem, antecipadamente, a visualização das conseqüências geradas por determinado grupo de fatores hipotéticos (Xavier, 2009).

Diante da necessidade de planejar adequadamente o aproveitamento dos recursos de solo na região semiárida, a utilização de modelos hidrossedimentológicos é imprescindível na geração de cenários alternativos de uso solo, que leve em consideração as práticas de conservação, buscando minimizar as perdas do solo e maximizar o escoamento superficial.

Com o intuito de analisar o quanto as alterações no uso e ocupação do solo interferem nos processos de escoamento superficial e produção de sedimentos e avaliar

uma alternativa de uso em bases conservacionista, cinco cenários foram gerados, sendo três deles simulando uma intervenção antrópica extrema:

- Cenário 1: a BRS com o uso e cobertura do solo da Figura 4.7; este é o cenário base para comparação com os demais;
- Cenário 2: toda a área da BRS coberta por vegetação nativa, neste caso a caatinga, representando uma situação de preservação da bacia;
- Cenário 3: toda a área da BRS coberta pelo cultivo de milho;
- Cenário 4: toda a área da BRS coberta pelo cultivo de feijão;
- Cenário 5: alternativa de reflorestamento da região sudoeste da bacia, conforme Figura 4.11.

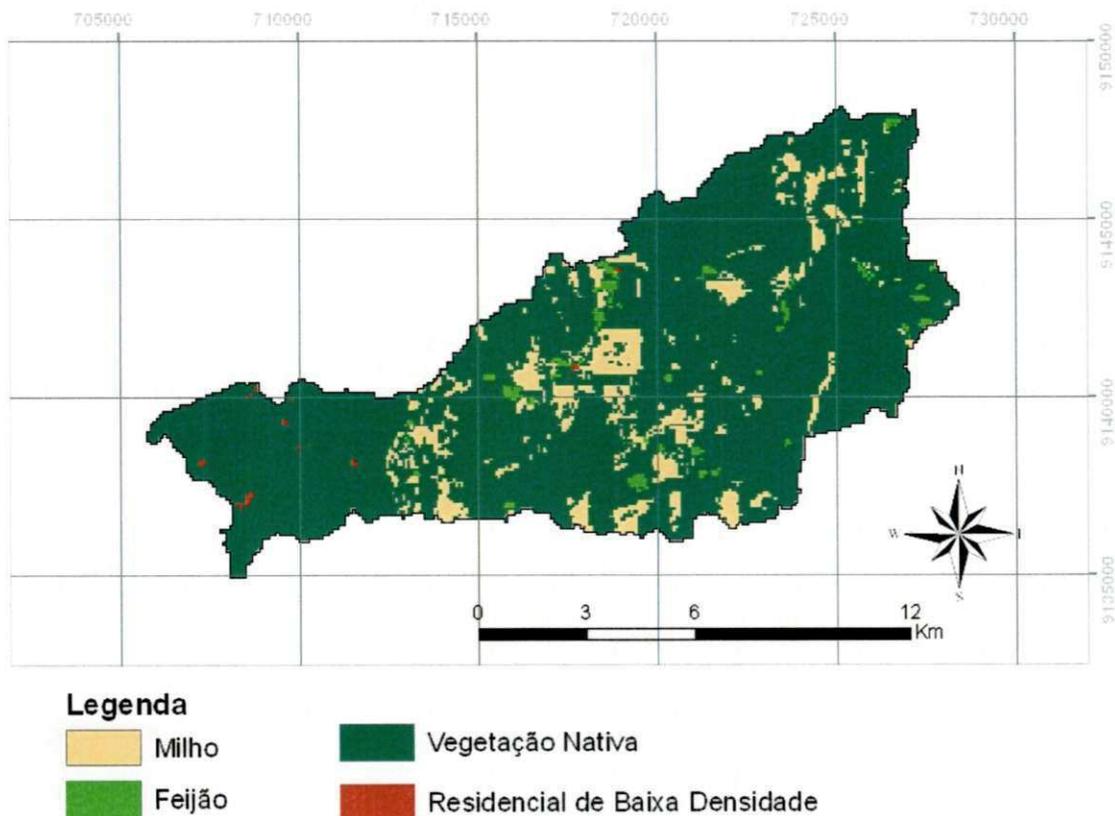


Figura 4.11 - Mapa de uso e cobertura do solo da BRS para o Cenário 5.

O Cenário 1 corresponde ao cenário base para comparação com os demais. A simulação dos cenários 2, 3 e 4 serviram para balizar a elaboração do cenário 5, que propõe um alternativa de modificação do uso do solo do cenário 1 com o intuito de tornar o manejo da bacia mais eficiente, otimizando a produção de escoamento

superficial, para fins de armazenamento, e reduzindo os efeitos erosivos deste processo. De uma forma geral o objetivo dessas simulações de cenários é guiar as ações presentes de forma a evitar ou reduzir os impactos ambientais da agricultura sobre a Bacia Representativa de Sumé.

O cenário 5, é portanto, uma proposta de reflorestamento com vegetação nativa, neste caso a caatinga, da região sudoeste da bacia, caracterizando uma prática conservacionista de caráter vegetativo, na qual utiliza a própria vegetação para proteger o solo contra a ação erosiva direta da precipitação.

A região onde foi proposto o reflorestamento está localizada na parte alta da bacia hidrográfica e com declividade acentuada, também é a região com maiores intervenções antrópicas, com cultivo de milho e feijão em extensas áreas. O solo predominante nesta região é do tipo Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico com algumas porções de afloramento rochoso.

O estudo realizado por Albuquerque et al (2001) afirma a necessidade de manutenção da vegetação nativa do tipo caatinga na proteção do solo contra a erosão, proporcionando um aumento considerável da infiltração do solo quando comparado com as unidades experimentais desmatadas.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2005), embora alguns solos sejam mais erodíveis que outros, é oportuno lembrar que a quantidade de solo perdida pela erosão, que ocorre em dadas condições, é influenciada não somente pelo próprio solo, mas pelo tratamento ou manejo que recebe. A erodibilidade do solo é, por conseguinte, influenciada muito mais pelo manejo que por qualquer outro fator.

Bertoni e Lombardi Neto (2005) também ressaltam que nas regiões com topografia acidentada, as florestas devem ser formadas no topo dos morros a fim de reduzir as enxurradas que se formam nas cabeceiras, atenuando os problemas de controle de erosão nos terrenos situados mais abaixo, e proporcionando, pela maior infiltração, uma regularização das fontes de água.

Sendo assim, com a alternativa de reflorestamento com vegetação nativa de toda a porção sudoeste da bacia, espera-se obter uma condição otimizada do uso do solo na BRS.

Nesta etapa de simulação foram utilizados dados de precipitação do Posto P49, que correspondem ao período de 1982 a 1991, sendo que os três primeiros anos desta série foram utilizados para aquecer o modelo. Neste período de simulação tem-se o ano de 1985 apresentando um alto índice pluviométrico anual, em torno de 1463,3 mm e em

contrapartida o ano de 1990 representando um forte período de estiagem com pluviometria anual de 265,6 mm; os demais anos apresentam precipitação anual em torno da média.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas diversas fases da aplicação do Modelo SWAT para simular os processos hidrossedimentológicos na Bacia Representativa de Sumé - BRS, conforme o procedimento descrito no capítulo anterior. Serão analisados os resultados relativos à delimitação, discretização e geração das Unidades de Resposta Hidrológica para a BRS e as sub-bacias de Umburana e Jatobá; parametrização na BRS; verificação da consistência dos resultados anuais da simulação com os resultados mensais e alguns eventos individuais. A avaliação das alternativas do uso do solo na BRS será feita com base nos resultados obtidos na simulação dos cenários formulados para este fim.

### 5.1 Delimitação e discretização das bacias

A delimitação da BRS resultou em uma área de 138,44 km<sup>2</sup>. As delimitações das sub-bacias de Umburana e Jatobá resultaram em áreas de 10,63 e 26,12 km<sup>2</sup> e discretização em 17 e 30 sub-bacias, respectivamente. As características morfométricas da BRS e das sub-bacias podem ser observadas na Tabela 5.1. Já as Figuras 5.1 e 5.2 apresentam as discretizações das sub-bacias.

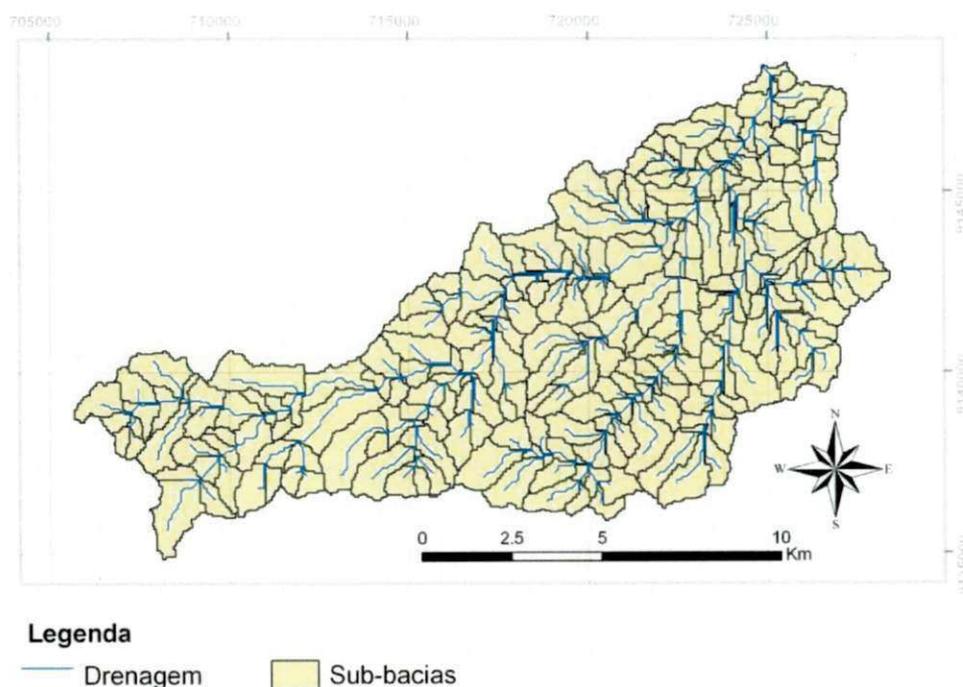


Figura 5.1 – Discretização da Bacia Representativa de Sumé

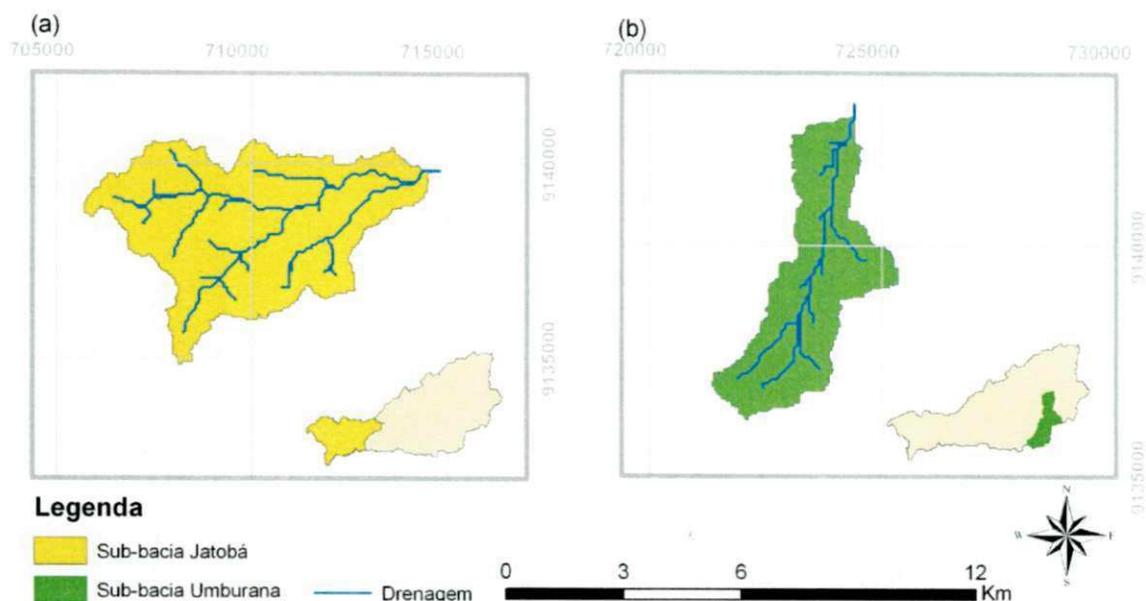


Figura 5.2 - Discretização das sub-bacias (a) Jatobá e (b) Umburana

Tabela 5.1 – Características morfométricas da BRS

<b>Parâmetros morfométricos</b>	<b>BRS</b>	<b>Jatobá</b>	<b>Umburana</b>
Área (km <sup>2</sup> )	138,4	26,12	10,63
Perímetro (m)	93240,0	36960,0	2442,0
Elevação máxima (m)	794	794	647
Elevação mínima (m)	536	603	557
Elevação média (m)	602,8	659,9	594,01

## 5.2 Unidades de Resposta Hidrológica

Na composição das HRUs, deve-se ressaltar que o uso do solo correspondente à residencial de baixa densidade, classificado no mapa de uso e cobertura do solo (Figura 4.7), foi descartado pelo modelo, devido a sua área na bacia ser inferior ao nível de sensibilidade adotado. Desta forma, observa-se nas Tabelas 5.2 e 5.3 a composição das HRUs para a BRS e para as sub-bacias, respectivamente.

Tabela 5.2 - Composição das HRUs da BRS

		Área (km <sup>2</sup> )	% da área
<b>Cobertura do solo</b>	Vegetação Nativa	117,32	84,74
	Cultura de milho	20,55	14,85
	Cultura de feijão	0,57	0,41
<b>Tipo de solo</b>	Luvissole Hipocrômico Órtico típico	84,31	60,90
	Luvissole Crômico Órtico típico	18,80	13,58
	Neossolo Litólico Eutrófico típico	8,42	6,08
	Neossolo Flúvico Eutrófico solódico	3,18	2,30
	Cambissolo Háptico Tbs	21,98	15,88
	Afloramento de rochas	1,75	1,26
<b>Intervalo de declividade</b>	0 a 4%	72,32	50,82
	4 a 8%	47,10	33,10
	8 a 12%	18,24	12,82
	12 a 16%	0,659	0,46
	16% a ∞	3,982	2,80

Tabela 5.3- Composição das HRUs das sub-bacias

		Jatobá		Umburana	
		Área (km <sup>2</sup> )	% da área	Área (km <sup>2</sup> )	% da área
<b>Cobertura do solo</b>	Vegetação Nativa	16,86	64,56	9,92	93,36
	Cultura de milho	9,26	35,44	0,65	6,10
	Cultura de feijão	-	-	0,06	0,54
<b>Tipo de solo</b>	Luvissole Hipocrômico Órtico típico	2,38	9,14	5,61	52,73
	Luvissole Crômico Órtico típico	-	-	1,82	17,17
	Neossolo Litólico Eutrófico típico	-	-	2,84	26,76
	Neossolo Flúvico Eutrófico solódico	-	-	0,36	3,36
	Cambissolo Háptico Tbs	21,98	84,15	-	-
	Afloramento de rochas	1,76	6,72	-	-
<b>Intervalo de declividade</b>	0 a 4%	11,95	45,75	6,15	57,85
	4 a 8%	7,69	29,43	3,59	33,75
	8 a 12%	3,60	13,77	0,76	7,20
	12 a 16%	0,08	0,33	0,013	0,13
	16% a ∞	2,80	10,72	0,11	1,08

### 5.3 Parametrização do SWAT para a BRS

As primeiras simulações da lâmina escoada sem uma calibração prévia apresentaram valores que não condiziam com a realidade. O modelo superestimou fortemente o escoamento superficial. Logo se fez necessário a calibração de alguns parâmetros referentes a esse processo (apresentados no capítulo anterior).

Para cada um dos parâmetros realizou-se uma variação do seu valor até que a lâmina escoada calculada se aproximasse o máximo possível da observada em campo. Um ajuste da lâmina escoada foi possível quando se adotou a seguinte combinação de parâmetros: ESCO = 0,1; SOL\_AWC = 0,4 mm/mm; CN<sub>2</sub> = 73; SURLAG = 8 dias; SOL\_K = 40 mm/h para solos Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico e 15 mm/h para o solo Cambissolo Háplico Tb. O parâmetro LAT\_TIME não apresentou sensibilidade, logo foi considerado nas simulações o seu valor de *default* igual a 31 dias.

Observou-se a permanência da superestimação da lâmina escoada para o ano de 1979; cabe ressaltar que este ano representou um ano de estiagem, com baixa pluviometria, o que deve ter impossibilitado um melhor ajuste do modelo para as vazões de baixa magnitude. Este fato pode ser observado na Figura 5.3, na qual estão dispostas as lâminas escoadas observadas para a BRS e as lâminas escoadas calculadas pelo modelo.

Apesar das grandes variações no volume precipitado, observa-se similaridade no comportamento da precipitação em relação às vazões observadas e simuladas com periodicidade mensal, apresentados na Figura 5.3.

Para a determinação do conjunto de parâmetros que provesse melhores resultados de lâmina escoada, os critérios estatísticos utilizados foram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE). Os valores de  $R^2$  e COE para a combinação dos parâmetros adotados se encontram na Tabela 5.4. Os meses onde não ocorreu escoamento para o período analisado foram, obviamente, muito bem representados pelo modelo; desta forma, para uma melhor compreensão do desempenho do mesmo fez-se análise sem considerar tais meses.

Observa-se que para os anos de 1976, 1977 e 1978, o COE atingiu valores que indicam um bom ajuste do modelo, mas a vazão simulada para o ano 1979 não atingiu um valor de COE favorável, por se tratar de um ano seco, as vazões de pequena magnitude não foram bem representadas. Os valores de  $R^2$  das vazões simuladas e observadas indicam uma boa correlação entre os dados, exceto para o ano de 1979.

Quando excluídos os meses nos quais não ocorreu escoamento, observou-se uma queda muito leve no desempenho do modelo, exceto para o ano de 1977, uma vez que, o mesmo não possuía lâmina nula observada. Desta forma, têm-se um bom desempenho do modelo SWAT para a simulação de escoamento superficial através de uma parametrização adequada dos seus componentes principais e utilização direta do banco de dados de culturas da interface ArcSWAT.

Tabela 5.4 – Desempenho do modelo para o período de 1976 a 1979

Ano	Todos os meses		Excluídos meses sem escoamento	
	R <sup>2</sup>	COE	R <sup>2</sup>	COE
1976	0,9934	0,9245	0,9913	0,8945
1977	0,9945	0,9932	0,9945	0,9932
1978	0,9967	0,9963	0,9959	0,9960
1979	0,8356	-1,8477	0,8045	-2,57

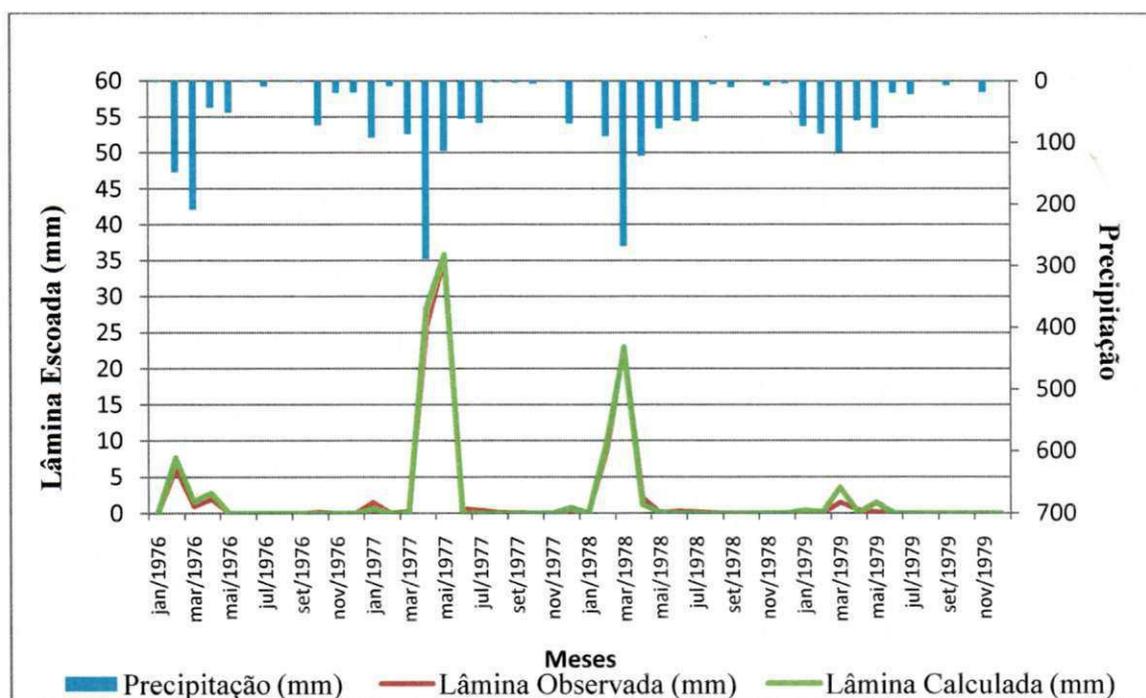


Figura 5.3 – Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para BRS no período de 1976 a 1979.

Deve-se ressaltar que para as lâminas escoadas observadas de até 1 mm observou-se uma subestimação do escoamento superficial simulado, não gerando escoamento para a maioria. Os dados mensais de lâmina observada e simulada e produção de sedimentos se encontram na Tabela 1 do Anexo. Esta subestimação foi também constatada por Uzeika (2009) e Carvalho Neto (2011) para a maioria dos eventos de baixa magnitude. Esta diferença pode ser explicada pela intensidade e duração dos eventos de pequena magnitude, o que resulta em grandes volumes de água infiltrados.

Cabe lembrar que a utilização do Método da Curva Número para estimar o escoamento superficial não leva em consideração a intensidade e a duração da chuva, mas apenas o volume diário precipitado, como relatam Saleh e Du (2004), vinculando a limitação do modelo SWAT em prever a vazão à utilização deste método. Além disso, com relação ao Método da Curva Número, tem-se que a capacidade máxima de armazenamento de água do solo está relacionada com o fator CN que, por sua vez, é determinado levando em consideração, dentre outros fatores, a umidade antecedente do solo, ou seja, quando o modelo simula uma umidade antecedente diferente do que realmente o solo apresenta haverá, conseqüentemente, uma subestimação ou superestimação do escoamento superficial.

A caracterização do comportamento da BRS com relação aos processos do ciclo hidrossedimentológico pode ser observada nas Tabelas 5.5 e 5.6, que apresentam resultados médios dos processos simulados nas HRUs. Deve-se ressaltar que o balanço hídrico não é fechado com as médias mensais (Tabela 5.5), o que não ocorre com as médias anuais (Tabela 5.6). Isto se dá porque nas médias anuais está incluso o processo denominado REVAP simulado pelo modelo, já discutido no Capítulo III, no qual a água é captada pelas raízes das plantas ou ascende novamente à zona insaturada, proporcionando nova retirada da demanda evaporativa, mas que não é contabilizada pela evapotranspiração.

Tabela 5.5 - Resumo das médias mensais para a BRS no período de 1976 a 1979

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
1	32,74	0,26	0,29	0,55	20,89	0,0	224,28
2	94,19	4,80	1,03	5,81	54,09	0,07	201,92
3	178,31	7,70	1,92	9,59	80,69	0,18	214,10
4	112,3	5,06	1,42	6,46	68,95	0,05	183,09
5	113,5	9,45	1,48	10,92	71,42	0,08	166,22
6	34,46	0,0	0,53	0,53	32,47	0,0	145,4
7	42,26	0,0	0,56	0,56	40,4	0,0	153,98
8	2,43	0,0	0,24	0,24	10,54	0,0	173,16
9	7,99	0,0	0,18	0,18	7,32	0,0	177,13
10	20,11	0,0	0,30	0,30	14,46	0,0	210,45
11	8,77	0,0	0,12	0,12	6,63	0,0	213,54
12	29,49	0,19	0,24	0,43	23,79	0,0	218,64

Tabela 5.6 - Resumo das médias anuais para a BRS no período de 1976 a 1979

Média anual	
Precipitação (mm)	673,5
Escoamento Superficial (mm)	27,29
Fluxo Lateral (mm)	8,29
REVAP (mm)	212,53
Evapotranspiração (mm)	425,39
Evapotranspiração Potencial (mm)	2277,4
Aporte de sedimentos (t/ha)	0,384

### Escoamento superficial e produção de sedimentos

O escoamento superficial é o principal componente do ciclo hidrológico responsável pela desagregação e o transporte de sedimentos. O modelo SWAT, como já foi relatado, utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS) para estimar a erosão do solo. Nesta equação os valores do volume escoado superficialmente são combinados com a vazão de pico que condicionam a desagregação e a transferência dos sedimentos para o canal aluvial.

O volume que infiltra é condicionado principalmente pelas características do solo e sua cobertura superficial. Sabe-se que, quanto maior o volume infiltrado menor o volume escoado, o que resultaria em uma capacidade reduzida em provocar erosão.

Desta forma, a análise dos resultados do escoamento superficial simulados pelo modelo pode explicar as produções de sedimentos resultantes dessas simulações.

Sendo o SWAT um modelo distribuído, há a possibilidade de obter resultados espaciais dos processos de escoamento e de produção de sedimentos, permitindo a análise das regiões da BRS nas suas condições. Sendo assim, as Figuras 5.4 e 5.5 apresentam o escoamento superficial médio anual gerado por cada sub-bacia e as Figuras 5.6 e 5.7 apresentam a produção média anual de sedimentos em cada sub-bacia.

Os maiores valores de escoamento foram produzidos na parte leste da bacia, com exceção do ano de 1979. Esta região corresponde à parte mais preservada da bacia e possui algumas áreas com declividade bastante acentuada. Os solos predominantes são os Luvissole Crômico Órtico típico, Neossolo Litólico Eutrófico típico e associação destes; o primeiro possui permeabilidade moderada, já o segundo é caracterizado por uma permeabilidade média a lenta, proporcionando um escoamento superficial forte.

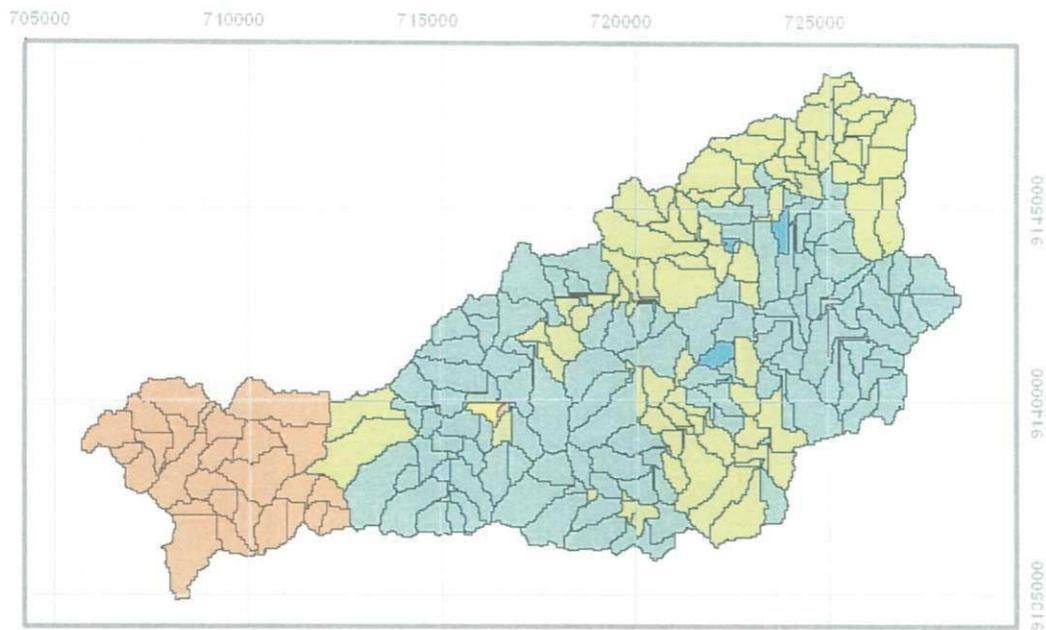
Observa-se também, que a porção sudoeste da bacia também apresenta valores significativos de escoamento superficial, principalmente para os anos de 1977 e 1978, que correspondem aos anos mais chuvosos do período simulado. Apesar da predominância dos Solos Cambissolo Háptico, que possuem permeabilidade alta, esta região apresenta as maiores declividades de toda a bacia, sendo considerado seu relevo fortemente ondulado, além disso, esta é a região da bacia com maiores intervenções antrópicas. Esta combinação de fatores (declividade e uso do solo) se sobressai em relação ao tipo de solo, favorecendo o escoamento superficial.

Analisando as HRUs que compõem cada sub-bacia verificaram-se quais as combinações de solo, uso e declividade que favorecem a produção de sedimentos. Logo observou-se uma forte influência do uso do solo. Conforme esperado, têm-se as sub-bacias com usos do solo mais críticos, ou seja, com maiores intervenções antrópicas, apresentando altas taxas de produção de sedimentos. Desta forma, têm-se produção de sedimentos elevadas nas sub-bacias com cultivo de milho, seguida das sub-bacias com cultivo de feijão; já as preservadas, ou seja, com vegetação nativa predominante, são as menos susceptíveis aos processos erosivos.

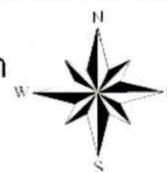
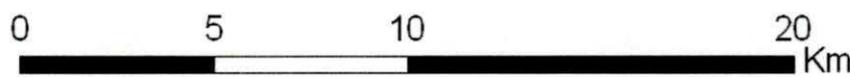
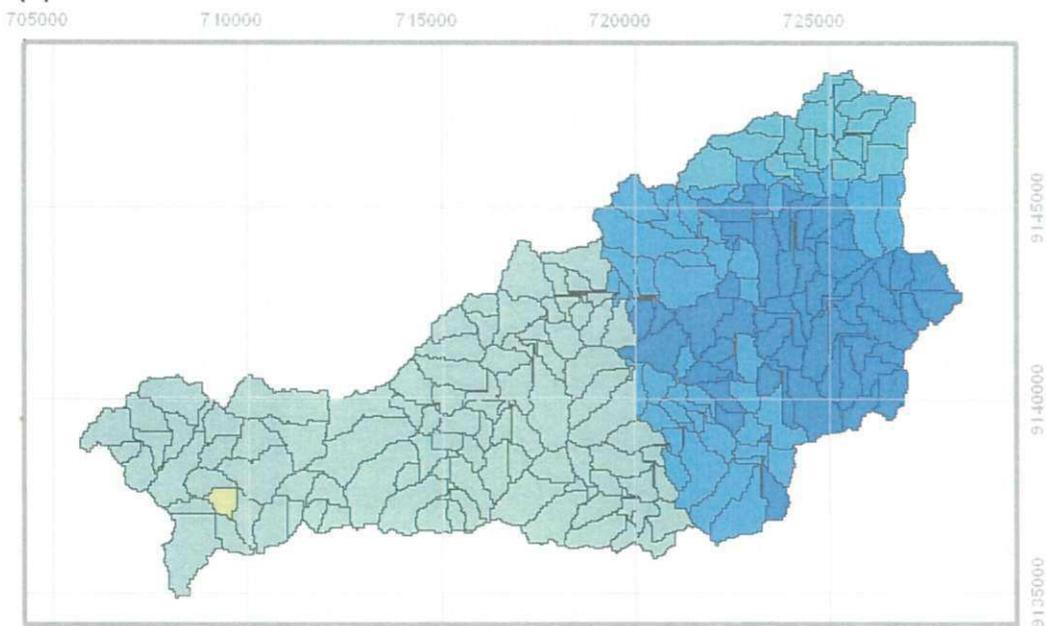
As regiões próximas ao exutório na porção nordeste da bacia e as localizadas na parte sudoeste apresentaram os maiores valores de produção de sedimentos. Ambas possuem declividades acentuadas e extensiva área agrícola, sendo que a primeira corresponde a uma região de solo Luvissole Hipocrômico Órtico, com alto fator de erodibilidade, e a segunda de solo Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico e grandes

porções de afloramento de rochas. De maneira geral, verifica-se uma relação direta do escoamento superficial e a produção de sedimentos quando analisado cada porção da bacia no mesmo período.

(a)



(b)



### Legenda

#### Escoamento Superficial (mm)

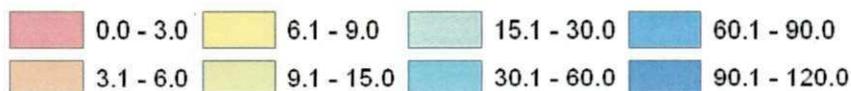
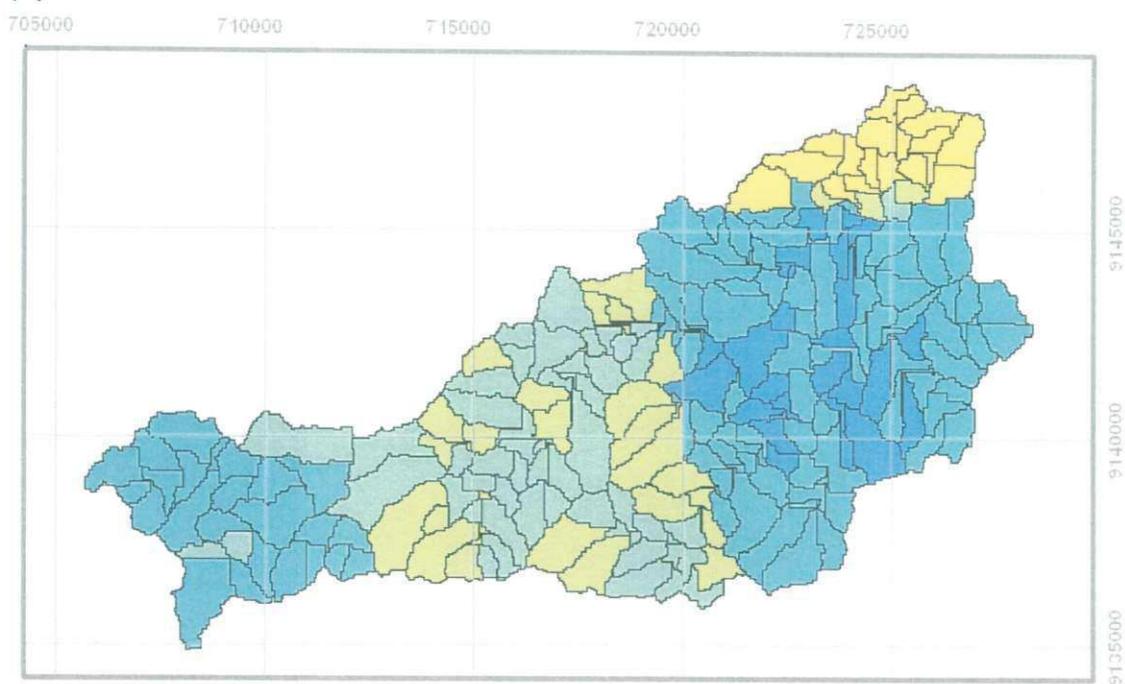
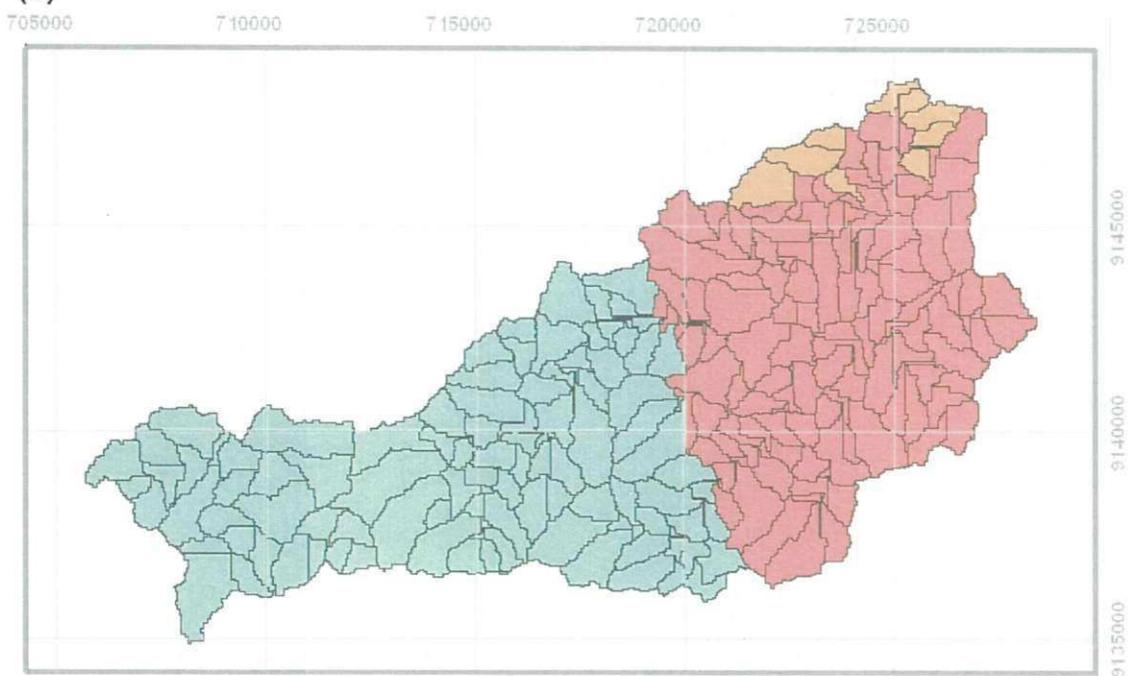


Figura 5.4 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977

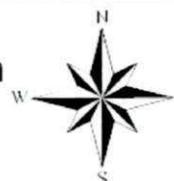
(a)



(b)



0 5 10 20 Km



### Legenda

#### Escoamento Superficial (mm)

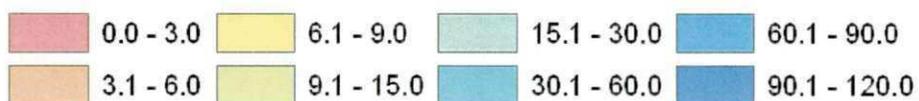
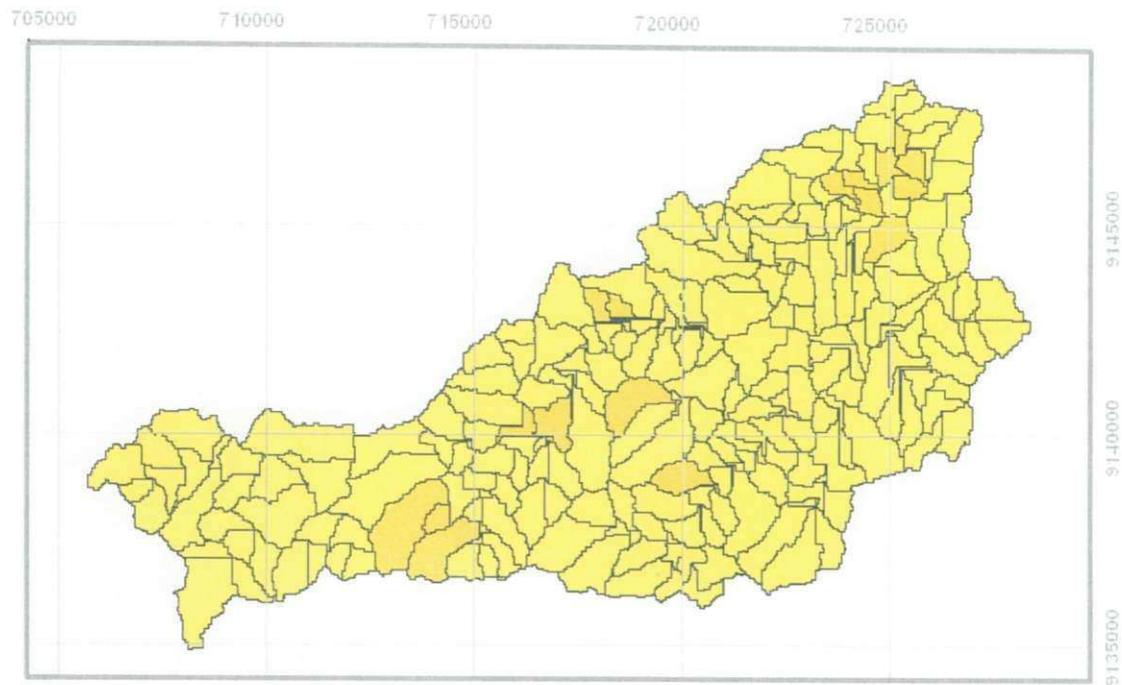
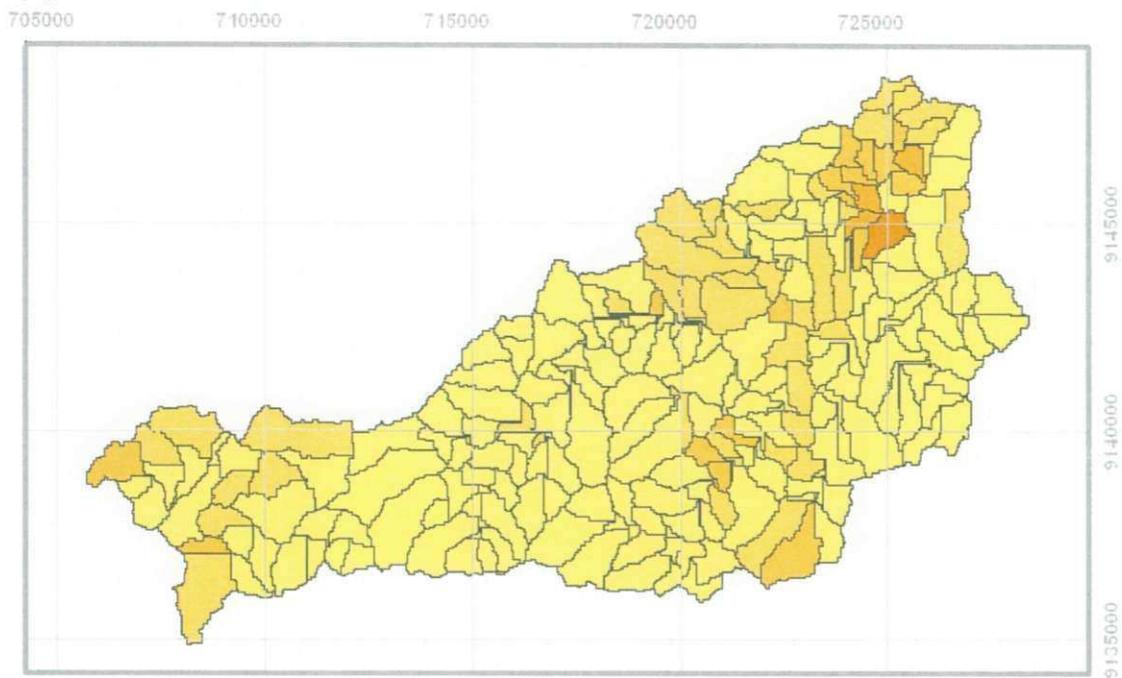


Figura 5.5 - Escoamento superficial médio anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979

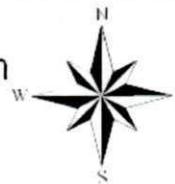
(a)



(b)



0 5 10 20 Km



### Legenda

Aporte de Sedimentos (t/ha)

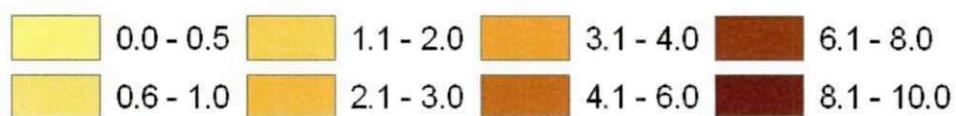
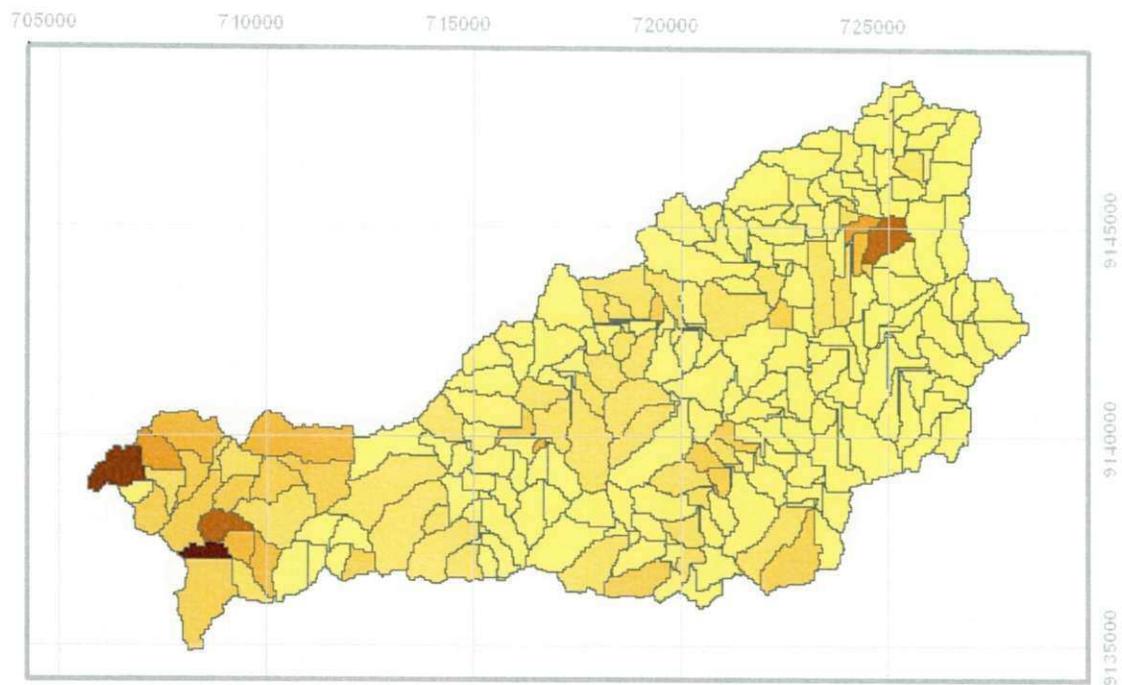
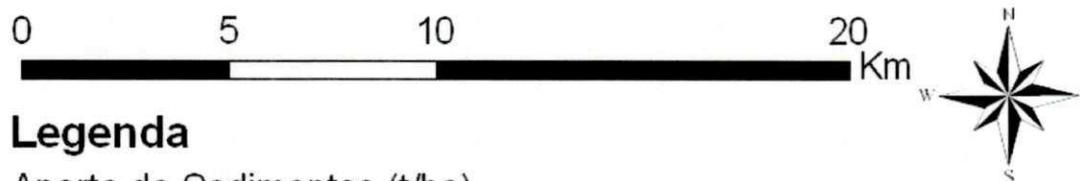
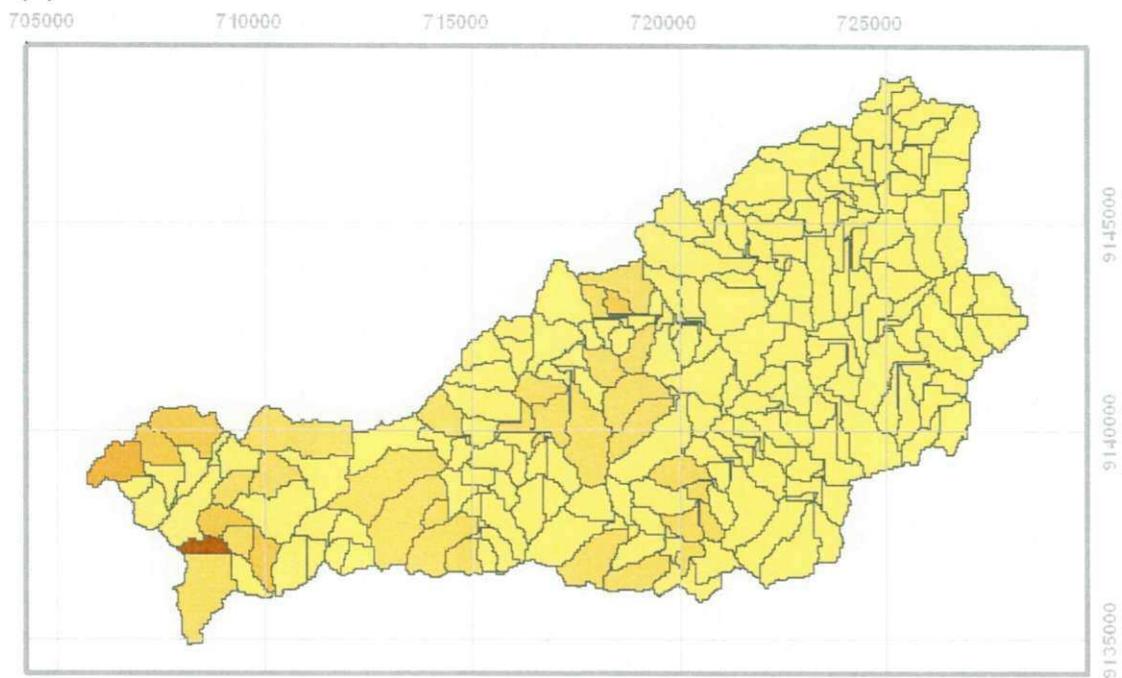


Figura 5.6 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1976 e (b) 1977

(a)



(b)



### Legenda

Aporte de Sedimentos (t/ha)

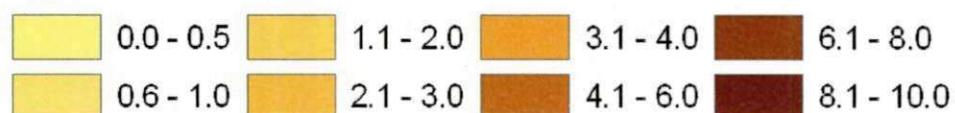


Figura 5.7 - Produção de sedimentos média anual para os anos de (a) 1978 e (b) 1979

#### 5.4 Verificação da consistência

A consistência do modelo foi verificada através da simulação nas sub-bacias de Jatobá e Umburana, dessa forma, uma comparação com os valores calculados pelo modelo pode ser realizada. As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam o desempenho do modelo para a simulação nas sub-bacias de Jatobá e Umburana em termos de eficiência de Nash-Sutcliffe e do coeficiente de determinação. Os dados mensais de lâmina observada e simulada e a produção de sedimentos calculada para as sub-bacias se encontram na Tabela 2 e 3 do Anexo.

Tabela 5.7 - Desempenho do modelo para a sub-bacia de Umburana

Ano	Todos os meses		Excluídos meses sem escoamento	
	$R^2$	COE	$R^2$	COE
1976	0,9882	0,9179	0,9883	0,8788
1977	0,9894	0,9661	0,9896	0,9624
1978	0,9073	0,8791	0,9356	0,8185
1979	0,9644	0,4203	0,9975	0,2029
<b>Média</b>	<b>0,9623</b>	<b>0,7958</b>	<b>0,9777</b>	<b>0,7156</b>

Tabela 5.8 - Desempenho do modelo para a sub-bacia de Jatobá

Ano	Todos os meses		Excluídos meses sem escoamento	
	$R^2$	COE	$R^2$	COE
1976	0,7983	0,6773	0,7802	0,5179
1977	0,9707	0,9365	0,9666	0,9257
1978	0,9988	0,9390	0,9988	0,9311
1979	0,9954	0,9364	0,9947	0,9082
<b>Média</b>	<b>0.9408</b>	<b>0.8723</b>	<b>0.93508</b>	<b>0.82073</b>

Todos os períodos analisados apresentaram bons resultados para o coeficiente de determinação, exceto o ano de 1976 para a sub-bacia de Jatobá. Com relação ao COE, para a sub-bacia de Umburana, o ajuste se mostrou adequado para os anos de 1976, 1977 e 1978, sendo que houve sempre uma redução deste índice quando excluídos os meses nos quais o escoamento superficial foi nulo. Para o ano de 1979, o ajuste se mostrou inadequado para as duas situações analisadas. Na sub-bacia de Jatobá, o COE menor foi encontrado para o ano de 1976, mesmo assim, de acordo com a classificação de Gotschalk et al. (1999), o ajuste ainda é aceitável.

Por fim, de uma forma geral, os valores médios do COE encontrados para as duas sub-bacias para todo o período de simulação classificam a parametrização como adequada e boa ( $\text{COE} > 0,75$ ), exceto para o COE médio determinado para a sub-bacia de Umburana na avaliação excluindo os meses sem vazão ( $\text{COE} = 0,7156$ ); mesmo assim, este ainda pode ser considerado aceitável.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a comparação gráfica entre a lâmina escoada observada e a calculada pelo modelo para as sub-bacias de Umburana e Jatobá, respectivamente, nas quais se pode observar uma boa correlação entre os dados. Para a melhor compreensão do comportamento da bacia ao longo do período simulado, nas Figuras 5.10 e 5.11 são apresentadas as vazões simuladas e observadas mensalmente juntamente com os valores de precipitação, nas quais se observam uma similaridade no comportamento destes processos e uma tendência do modelo em subestimar as vazões máximas.

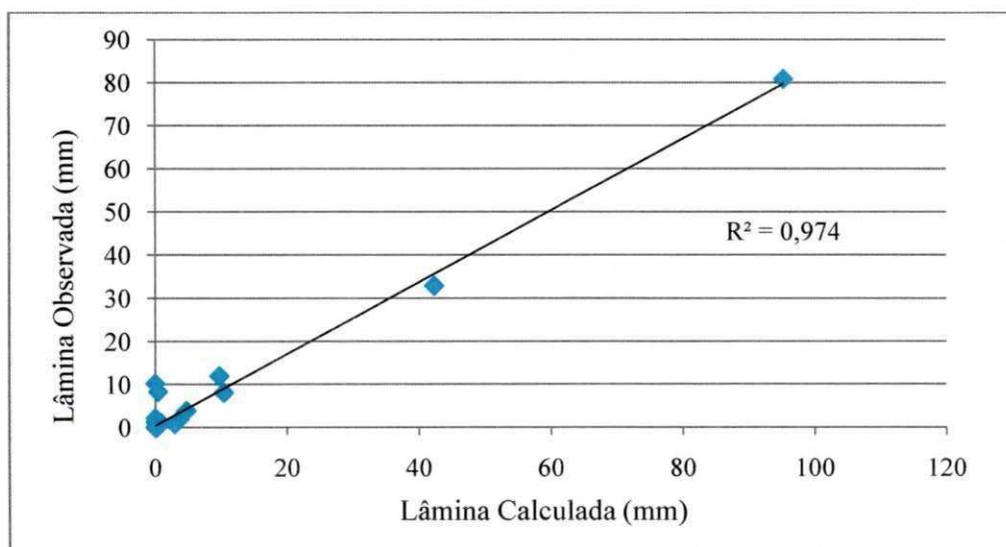


Figura 5.8 - Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para a sub-bacia de Umburana

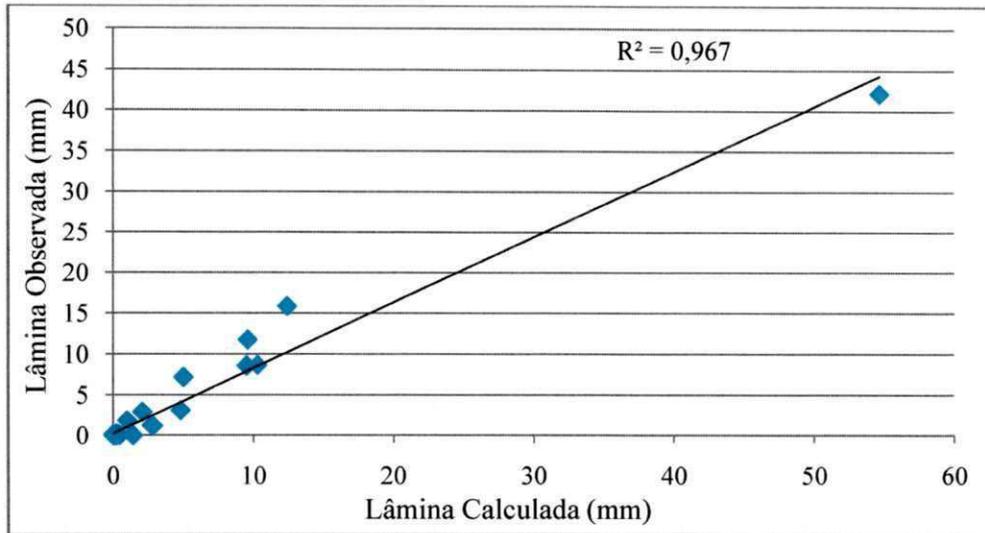


Figura 5.9 - Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para a sub-bacia de Jatobá

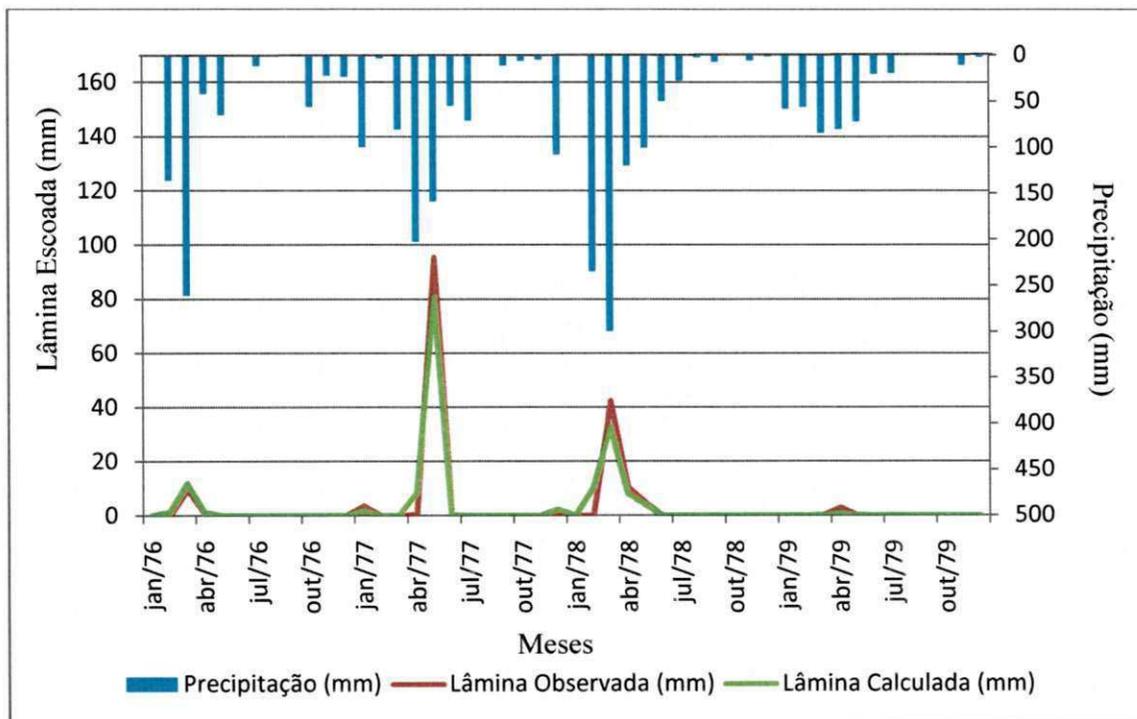


Figura 5.10 - Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979

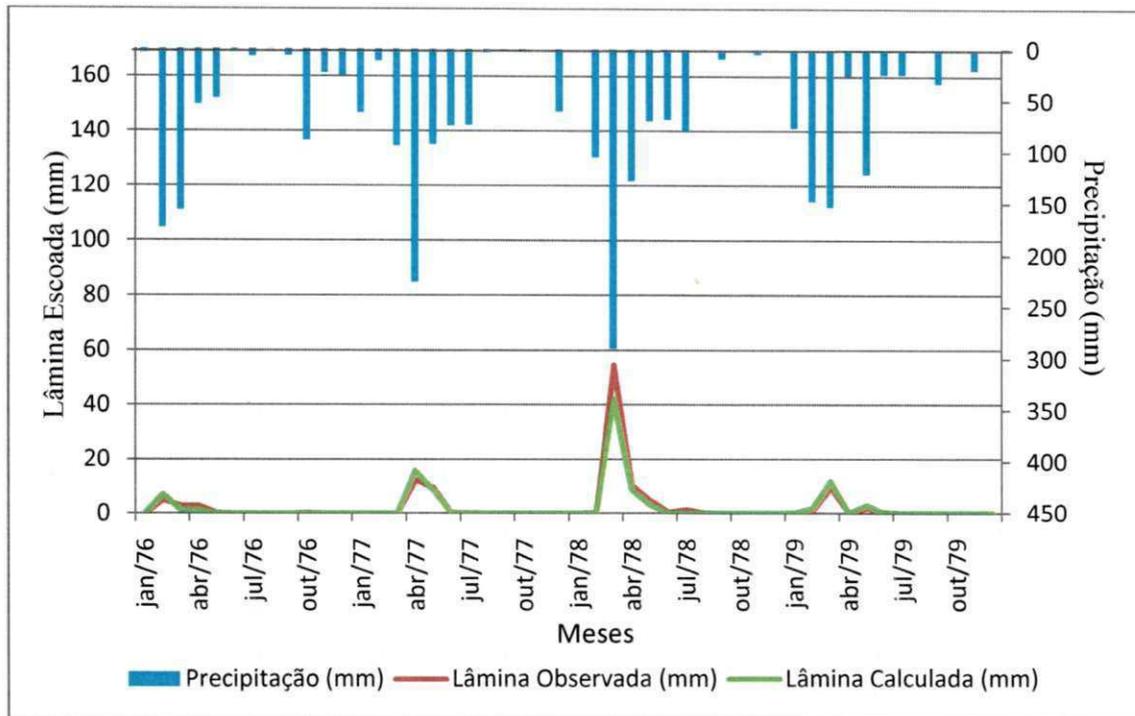


Figura 5.11 - Dados mensais de precipitação, lâmina escoada observada e simulada para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979

Os dados diários observados de lâmina escoada disponíveis para a BRS e as sub-bacias de Umburana e Jatobá foram também comparados aos dados de lâmina escoada calculada pelo modelo no passo de tempo diário e encontram-se na Tabela 5.9. Observa-se uma convergência entre os dados com  $R^2$  de 0,9716 e um bom ajuste com COE de 0,9645, como pode ser observado na Figura 5.12.

Lopes (2003) simulou a produção de sedimentos com o modelo Kineros2 para as sub-bacias da BRS para os eventos diários utilizados neste trabalho. Desta forma, comparou-se a produção de sedimentos calculada pelo modelo SWAT e aqueles simulados por Lopes (2003) para um coeficiente de impacto das gotas de chuva ( $c_f$ ) de  $10^{11}$ , como mostra a Tabela 5.9. Observa-se que, com exceção das cheias nº 9 e nº 11, a produção de sedimentos simulada pelo modelo SWAT obteve valores superiores aos encontrados por Lopes (2003), o que mostra segundo Carvalho Neto (2011) uma sensibilidade do modelo em simular os processos hidrossedimentológicos na superfície da bacia. Cabe ressaltar que os dados de produção de sedimentos encontrados por Lopes (2003) são valores simulados pelo modelo Kineros2 apenas com o intuito de analisar a interferência do parâmetro  $c_f$  na produção de sedimentos, sendo que, não houve validação deste parâmetro.

Aplicando a MUSLE para cada HRU, o modelo SWAT considera o comprimento de rampa como sendo a distância entre os pontos extremos da mesma, e a declividade baseia-se na relação entre a diferença altimétrica e a distância entre esses pontos. O fator topográfico (LS) é então determinado utilizando apenas os extremos de cada HRU, tendo desta forma um comprimento de rampa sempre uniforme que não favorece a deposição de sedimentos, o que na realidade não ocorre nas HRUs.

Pode-se dizer que a determinação do fator LS pelo modelo SWAT não está considerando as características geomorfológicas ao longo da rampa, não contabilizando, assim, pontos de deposição; conseqüentemente, o aporte de sedimentos gerado pelas bacias quase em sua totalidade atinge o canal da sub-bacia. De acordo com Mansor et al. (2002), a discretização espacial do fator LS é um dos maiores desafios para a modelagem matemática da erosão, tendo em vista a grande complexidade do relevo em uma bacia hidrográfica.

Uzeika (2009), utilizando o modelo SWAT na bacia de Arvorezinha, obteve valor para a produção de sedimentos média anual de 701,18 ton/ano, enquanto que a produção de sedimentos média anual observada na bacia foi de 146,53 ton /ano; isto significa que o modelo SWAT superestimou, em aproximadamente, cinco vezes a média anual.

Contudo, pode-se dizer que os resultados mensais e anuais são mais confiáveis que os dados diários para a BRS, pois nestes, os efeitos da defasagem são reduzidos devido aos somatórios. Por fim, o modelo SWAT apresentou um bom desempenho ao simular o escoamento superficial, porém seu desempenho na simulação sedimentológica (aporte e produção de sedimentos) precisa ser melhor investigado comparando-os com valores observados em campo.

Tabela 5.9 - Escoamento superficial observado e simulado e produção de sedimentos simulada por Lopes (2003) e calculadas pelo SWAT

Nº da cheia	Bacia	Lâmina observada (mm)	Lâmina calculada (mm)	Produção de sedimentos (Lopes, 2003) (kg/ha)	Produção de sedimentos SWAT (kg/ha)
1	Umburana	68,00	70,00	2,99	60,00
9	Umburana	11,40	11,51	223,00	110,00
11	Umburana	6,11	4,02	253,00	10,00
11	Jatobá	2,41	1,88	8,00	50,00
16	Jatobá	7,09	13,77	27,00	230,00
6	BRS	4,68	4,77	24,00	40,00
7	BRS	1,17	0,67	5,00	10,00
13	BRS	7,02	15,77	44,75	50,00

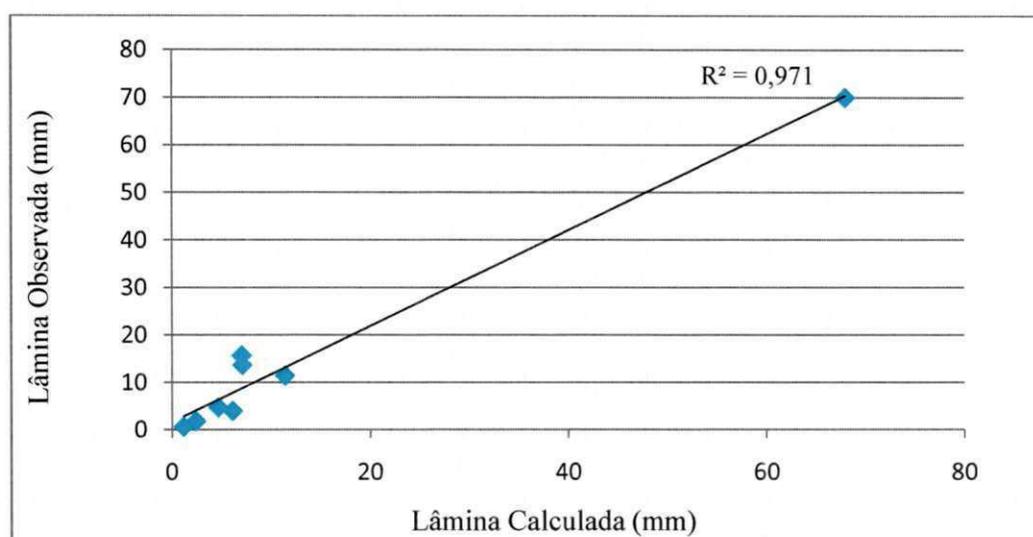


Figura 5.12- Comparação gráfica entre lâmina observada e calculada para os eventos diários

O comportamento das sub-bacias de Umburana e Jatobá com relação aos processos do ciclo hidrossedimentológico pode ser observado nas Tabelas 5.10 e 5.11, que apresentam resultados médios dos processos simulados nas HRUs. Como já relatado no item 5.3, somente quando analisadas as médias anuais, o balanço hídrico para as sub-bacias é fechado, devido à consideração do processo de REVAP.

Tabela 5.10 - Resumo das médias mensais para a sub-bacia Umburana no período de 1976 a 1979

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
Janeiro	53,06	0,02	0,06	0,27	33,09	0,00	223,01
Fevereiro	36,77	0,00	0,07	2,83	31,61	0,00	203,54
Março	95,7	0,45	0,09	5,02	62,62	0,01	210,81
Abril	47,3	0,03	0,10	9,89	51,95	0,00	207,7
Maiο	113,9	0,29	0,15	19,65	85,87	0,00	157,57
Junho	20,5	0,00	0,11	14,71	25,89	0,00	161,06
Julho	19,6	0,00	0,09	4,32	24,41	0,00	174,16
Agosto	0,00	0,00	0,07	1,62	0,00	0,00	181,49
Setembro	0,00	0,00	0,05	0,61	0,00	0,00	184,31
Outubro	0,00	0,00	0,04	0,26	0,00	0,00	214,67
Novembro	10,8	0,00	0,04	0,12	10,16	0,00	215,15
Dezembro	1,9	0,00	0,03	0,06	2,53	0,00	231,99

Tabela 5.11 - Resumo das médias mensais para a sub-bacia Jatobá no período de 1976 a 1979

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
Janeiro	63,46	0,15	1,4	1,55	31,92	0,01	207,11
Fevereiro	99,01	2,95	3,87	6,80	98,04	0,27	190,31
Março	206,30	13,74	4,70	18,41	110,02	0,31	207,19
Abril	28,80	0,22	3,99	4,19	83,52	0,00	185,16
Maiο	123,00	3,85	4,29	8,13	105,4	0,11	146,49
Junho	24,40	0,00	1,21	1,21	35,51	0,00	158,000
Julho	24,40	0,00	0,76	0,76	27,86	0,00	154,74
Agosto	0,60	0,00	0,15	0,15	3,32	0,00	179,31
Setembro	33,00	0,00	1,08	1,08	30,37	0,00	177,03
Outubro	0,000	0,00	0,12	0,12	0,52	0,00	215,22
Novembro	19,8	0,00	0,46	0,46	17,29	0,00	210,72
Dezembro	0,00	0,00	0,13	0,13	2,00	0,00	237,67

Tabela 5.12 - Resumo das médias anuais para as sub-bacias Umburana e Jatobá no período de 1976 a 1979

<b>Média anual</b>	<b>Umburana</b>	<b>Jatobá</b>
Precipitação (mm)	688,5	665,6
Escoamento Superficial (mm)	41,45	22,44
Fluxo Lateral (mm)	1,55	24,97
REVAP (mm)	229,51	80,87
Evapotranspiração (mm)	415,90	539,5
Evapotranspiração Potencial (mm)	2316,70	2262,7
Aporte de sedimentos (t/ha)	0,247	0,781

## 5.5 Simulação de cenários

Mesmo conhecendo as incertezas do modelo, a simulação de cenários foi utilizada com o intuito de analisar as respostas no escoamento superficial e produção de sedimentos aos diferentes usos e manejos da Bacia Representativa de Sumé e propor um cenário cujas modificações no uso proporcionassem manejo mais eficiente da mesma.

### 5.5.1 Cenário 1

No Cenário1 a BRS é apresentada sob a perspectiva do uso e cobertura do solo da Figura 4.7, sendo este, portanto, o cenário base para comparações com os demais. Com o intuito de obter uma visualização espacial do escoamento superficial e do aporte de sedimentos para a BRS neste cenário, dois meses dos anos de 1986 e 1988 foram escolhidos para representar o período simulado.

A área de maior escoamento superficial coincide com a ocorrência predominante do solo Luvisolo Crômico Órtico Típico na parte sudeste da bacia, que possui permeabilidade moderada (Figuras 5.13 e 5.14).

A visualização espacial do aporte de sedimentos mensal para este cenário, como mostrado nas Figuras 5.15 e 5.16, permite constatar que a porção sudoeste da BRS se destaca pela maior taxa de aporte de sedimentos. Predomina, nesta região, o solo do tipo Cambissolo Háptico Tb Eutrófico Típico, que não possui erodibilidade significativa ( $USLE_K = 0,15843$ ) em comparação com os outros tipos de solo da bacia. Porém esta

região é caracterizada por forte influência antrópica, principalmente com o cultivo de milho e, além disso, tem declividade acentuada, como pode ser verificado na Figura 4.4 que apresenta o mapa de distribuição das declividades na bacia. Desta forma estas áreas estão submetidas a maior desprendimento e transporte de sedimentos.

Destacam-se também na produção de sedimentos algumas sub-bacias localizadas na parte central da bacia e próximas ao exutório (Figura 5.15(a)). Tais localizações coincidem com a ocorrência dos solos Luvisolo Hipocrômico Órtico típico e Neossolo Flúvico Ta Eutrófico Solódico, ambos com elevado fator de erodibilidade ( $USLE_K = 0,17765$  e  $0,1893$  respectivamente) em comparação com os demais solos encontrados na BRS.

Como já relatado, a produção de sedimentos no modelo SWAT é determinada pela MUSLE; sendo assim, os parâmetros de maior efeito na produção de sedimentos são aqueles relacionados aos fatores da mesma. Analisando o aporte de sedimentos por HRU verifica-se que o mesmo é bastante sensível às mudanças de declividade, representada na MUSLE pelo fator topográfico (LS), como verificado, por exemplo, nas HRUs 1171 e 1123 que possuem os maiores valores para o fator LS (7,73 e 6,57 respectivamente) e correspondem às bacias com maior taxa de produção de sedimentos.

Com relação ao fluxo nos canais, analisando a quantidade de sedimentos que entra e sai de cada trecho de canal, observou-se em alguns a deposição de sedimentos ao invés de transporte. Nos canais, a deposição de sedimentos é estimada a partir da comparação entre a concentração máxima de sedimentos e a concentração de sedimentos existente no início de cada intervalo de tempo. Sendo a concentração no início do intervalo de tempo superior a máxima, tem-se o processo de deposição, como pode ser observado nas Figuras 5.17 e 5.18 há uma fração de sedimentos que se deposita no trecho de canal, principalmente naqueles de segunda e terceira ordem.

A caracterização do comportamento da bacia neste cenário pode ser observada nas Tabelas 5.13 e 5.14. A precipitação, o escoamento superficial e a produção de sedimentos

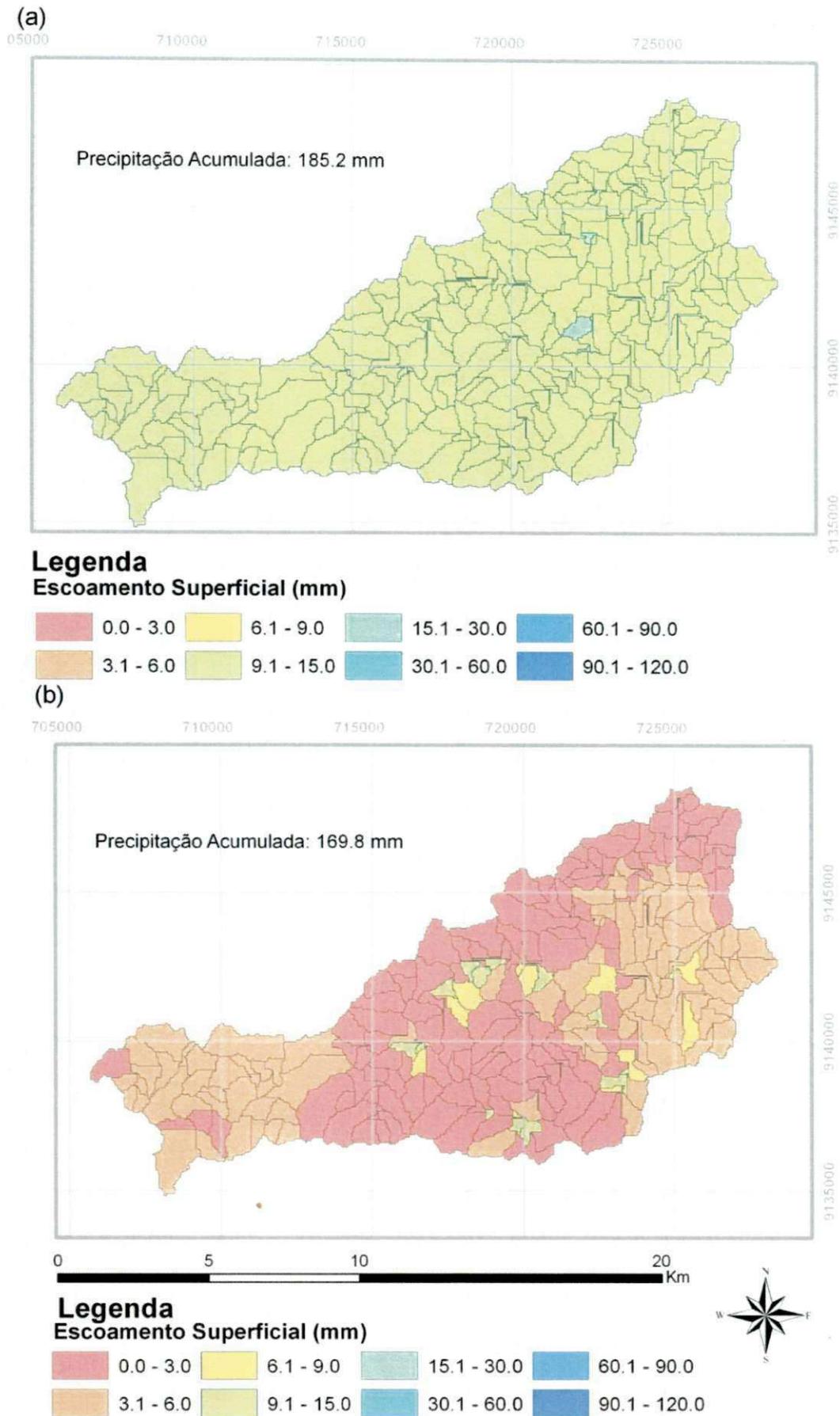


Figura 5.13 - Escoamento superficial nos meses de (a) Fevereiro e (b) Abril de 1986

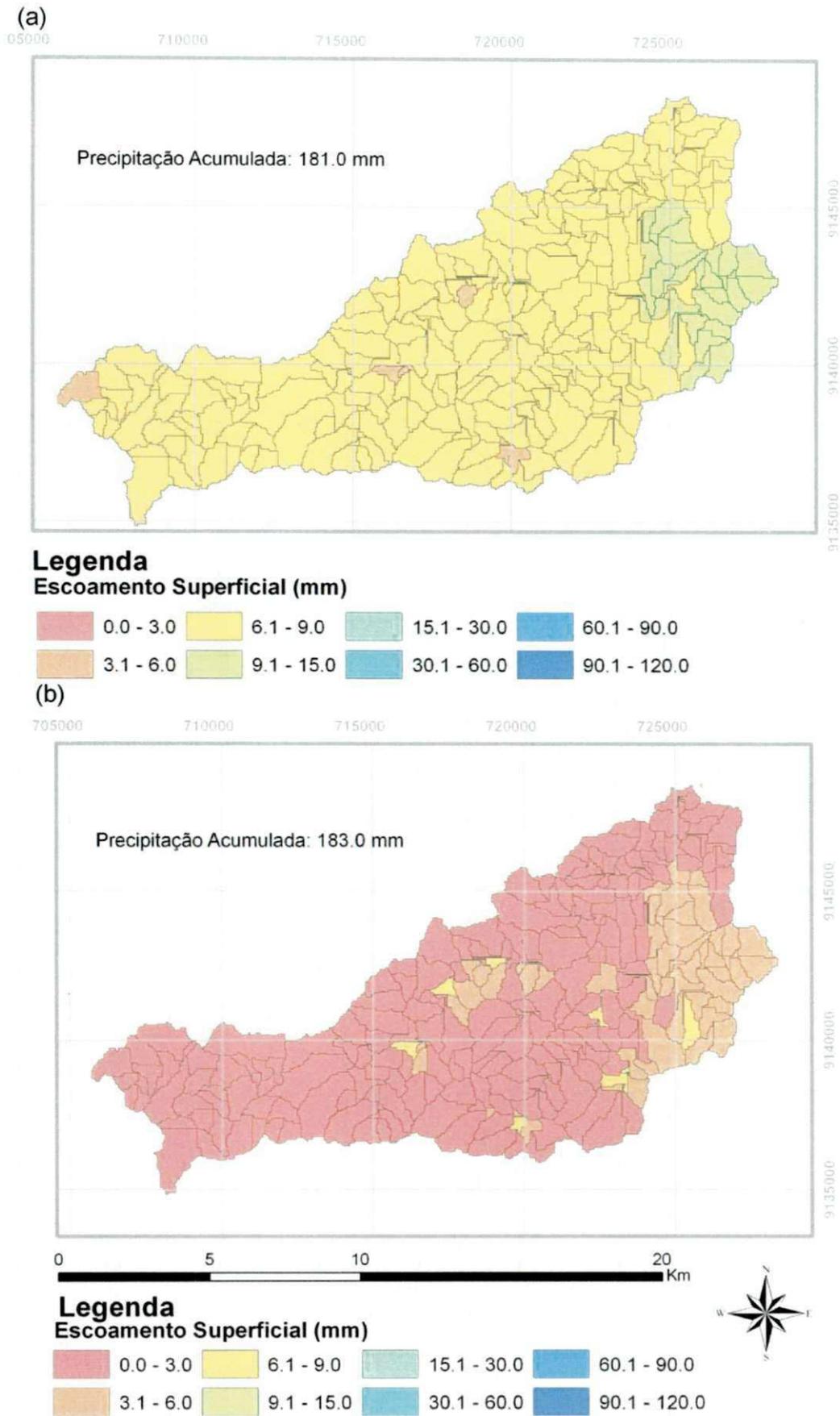


Figura 5.14 - Escoamento superficial nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Março de 1988

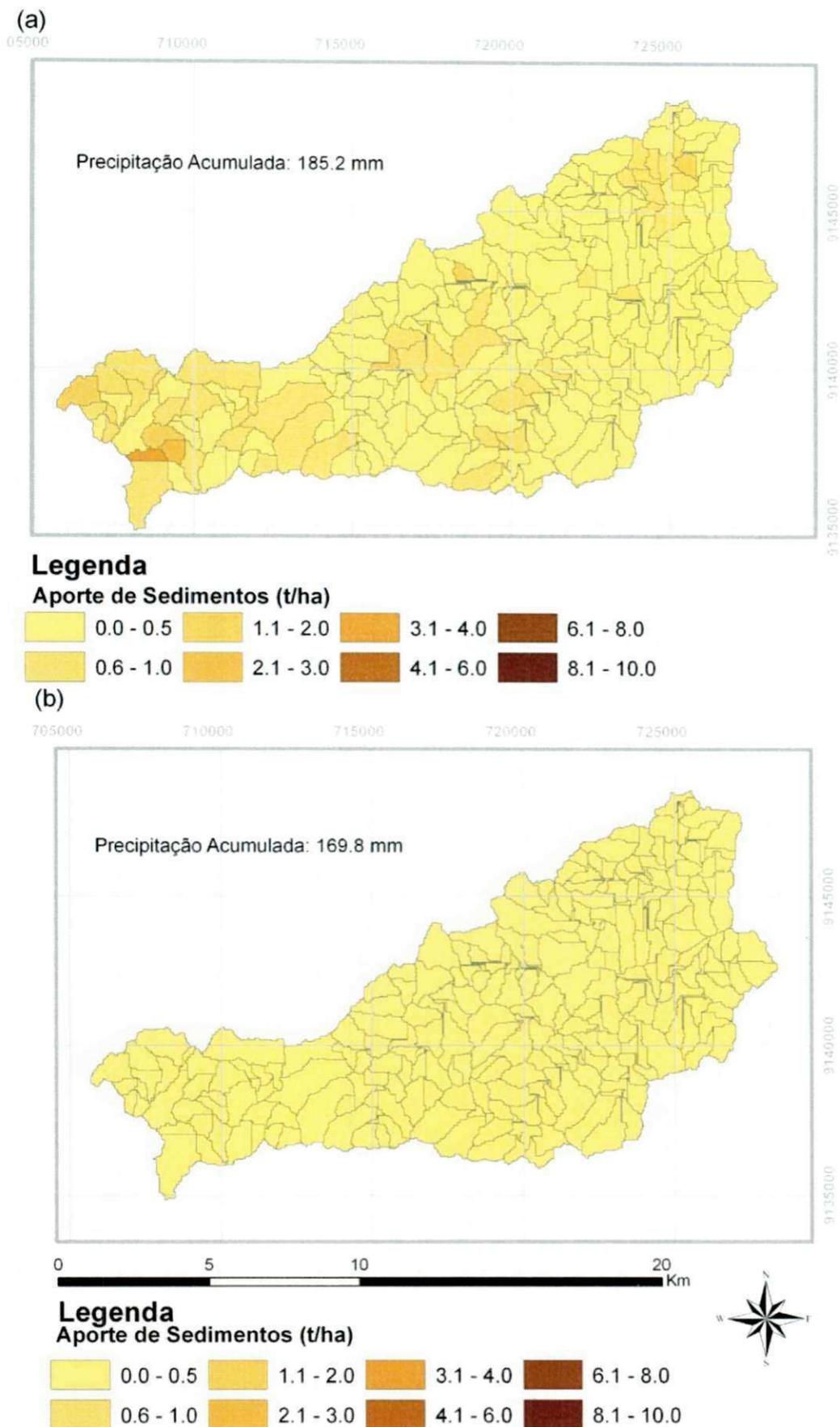


Figura 5.15 - Aporte de sedimentos nos meses de (a) Fevereiro e (b) Abril de 1986

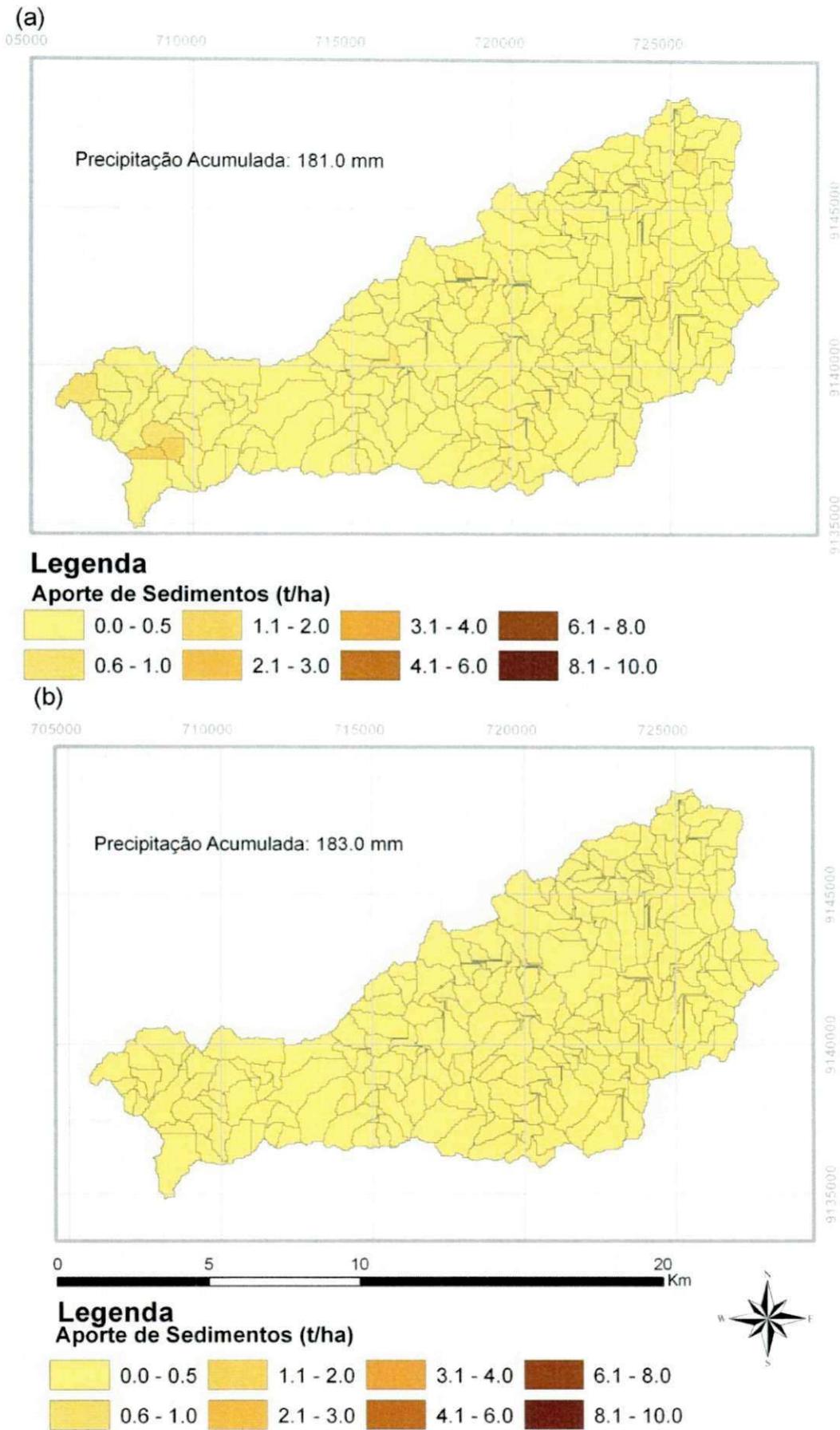
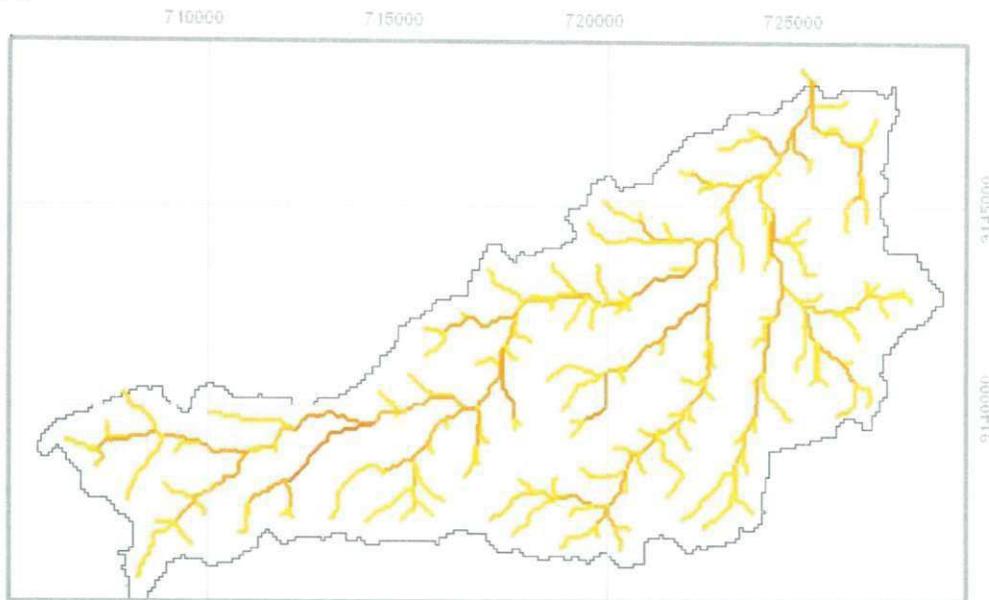
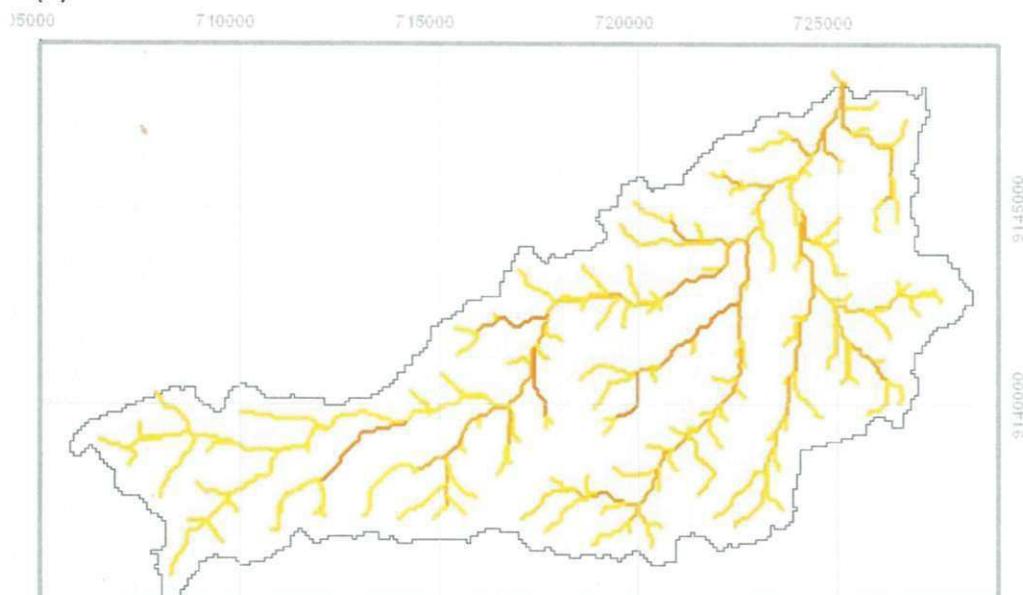


Figura 5.16 - Aporte de sedimentos nos meses de (a) Fevereiro e (b) Março de 1988

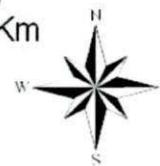
(a)



(b)



0 5 10 20 Km



### Legenda

Deposição de Sedimentos (%)



Figura 5.17 - Deposição de sedimentos nos canais da BRS nos meses de (a) Fevereiro  
(b) Abril de 1988

Tabela 5.13 - Resumo das médias mensais para o Cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
Janeiro	26,10	0,0	0,27	0,27	24,85	0,0	225,55
Fevereiro	156,84	12,15	1,27	13,38	61,86	0,28	205,73
Março	212,63	25,4	1,86	27,22	90,82	0,42	221,62
Abril	144,44	6,46	1,81	8,24	83,35	0,08	179,32
Mai	48,11	0,17	0,88	1,05	56,27	0,0	190,37
Junho	45,44	0,42	0,52	0,94	32,38	0,01	152,62
Julho	49,51	1,19	0,6	1,77	39,73	0,01	155,59
Agosto	11,31	0,00	0,22	0,22	12,57	0,00	164,59
Setembro	9,54	0,00	0,18	0,18	8,23	0,00	178,71
Outubro	3,39	0,00	0,12	0,12	3,87	0,00	215,65
Novembro	5,27	0,00	0,1	0,1	4,31	0,00	216,52
Dezembro	41,00	3,53	0,35	3,88	21,92	0,06	223,24

Tabela 5.14 - Resumo das médias anuais para o Cenário 1

Média anual	
Precipitação (mm)	753,58
Escoamento Superficial (mm)	49,32
Fluxo Lateral (mm)	8,18
REVAP (mm)	253,72
Evapotranspiração (mm)	440,16
Evapotranspiração Potencial (mm)	2329,51
Aporte de sedimentos (t/ha)	0,860

### 5.5.2 Cenário 2

No cenário 2, a BRS é apresentada sem intervenções antrópicas, ou seja, toda a bacia coberta por vegetação nativa. Desta forma, foi utilizada a cobertura do solo “range brush”, pertencente ao banco de dados do modelo, por melhor representar a vegetação caatinga.

Neste cenário, as menores taxas de escoamento superficial foram encontradas na região de solo Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico, como observado na Figura 5.18a, que possui permeabilidade muito rápida, o que favorece o processo de infiltração

e conseqüentemente reduz o volume do escoamento superficial. A variação do escoamento superficial entre os Cenários 2 e 1 pode ser observado na Figura 19, nota-se o aumento em todas as sub-bacias do escoamento, sendo que, este aumento é mais discreto nas sub-bacias localizadas à sudoeste e na porção inferior da BRS.

Como se esperava, houve redução da produção de sedimentos em toda a bacia devido à proteção vegetal oferecida pela caatinga, ficando a produção de sedimentos vinculada principalmente à erosão não-antrópica (Figura 5.18b).

A caracterização do comportamento da bacia no Cenário 2 pode ser observada nas Tabelas 5.15 e 5.16.

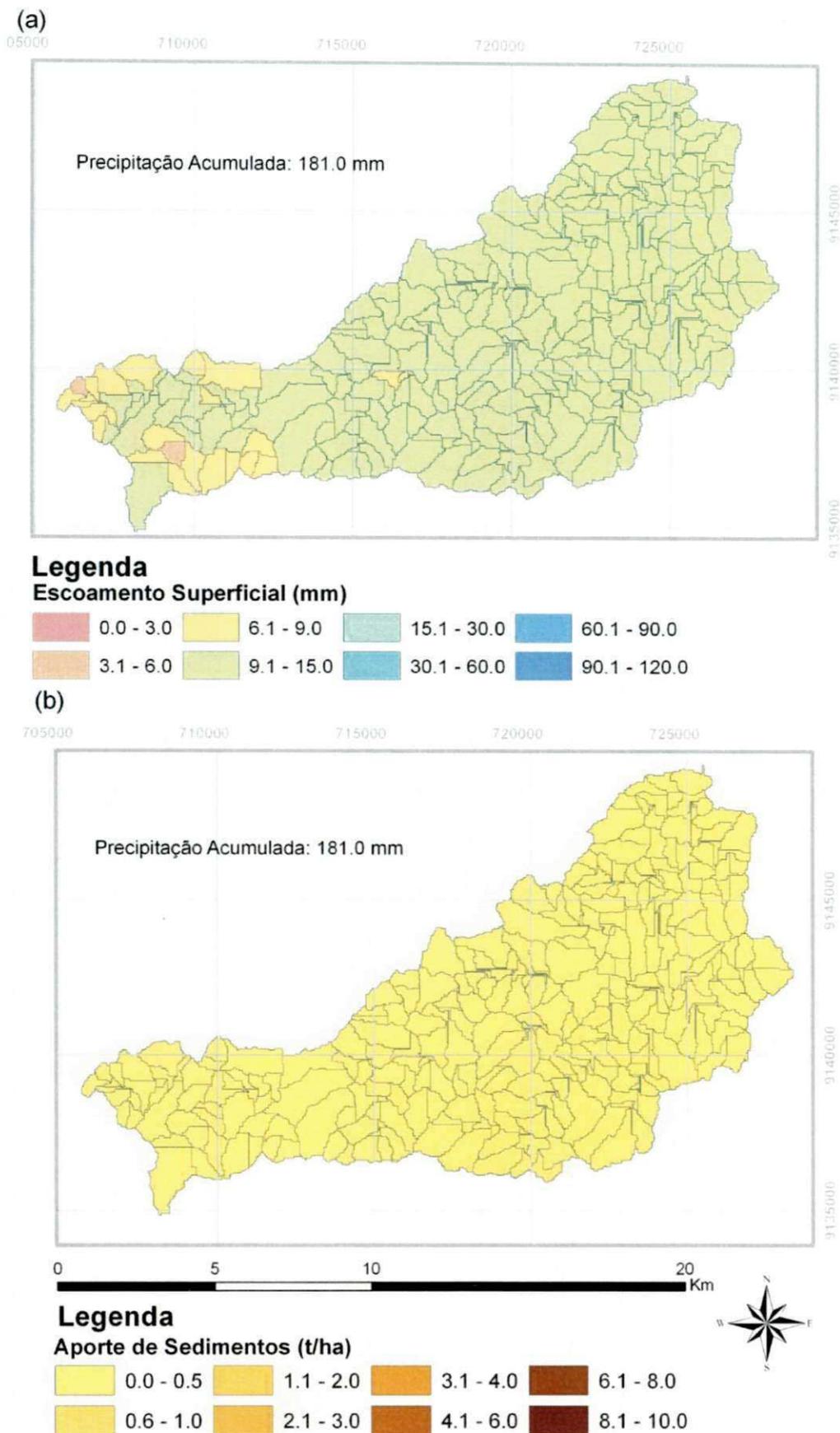


Figura 5.18 - Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário 2

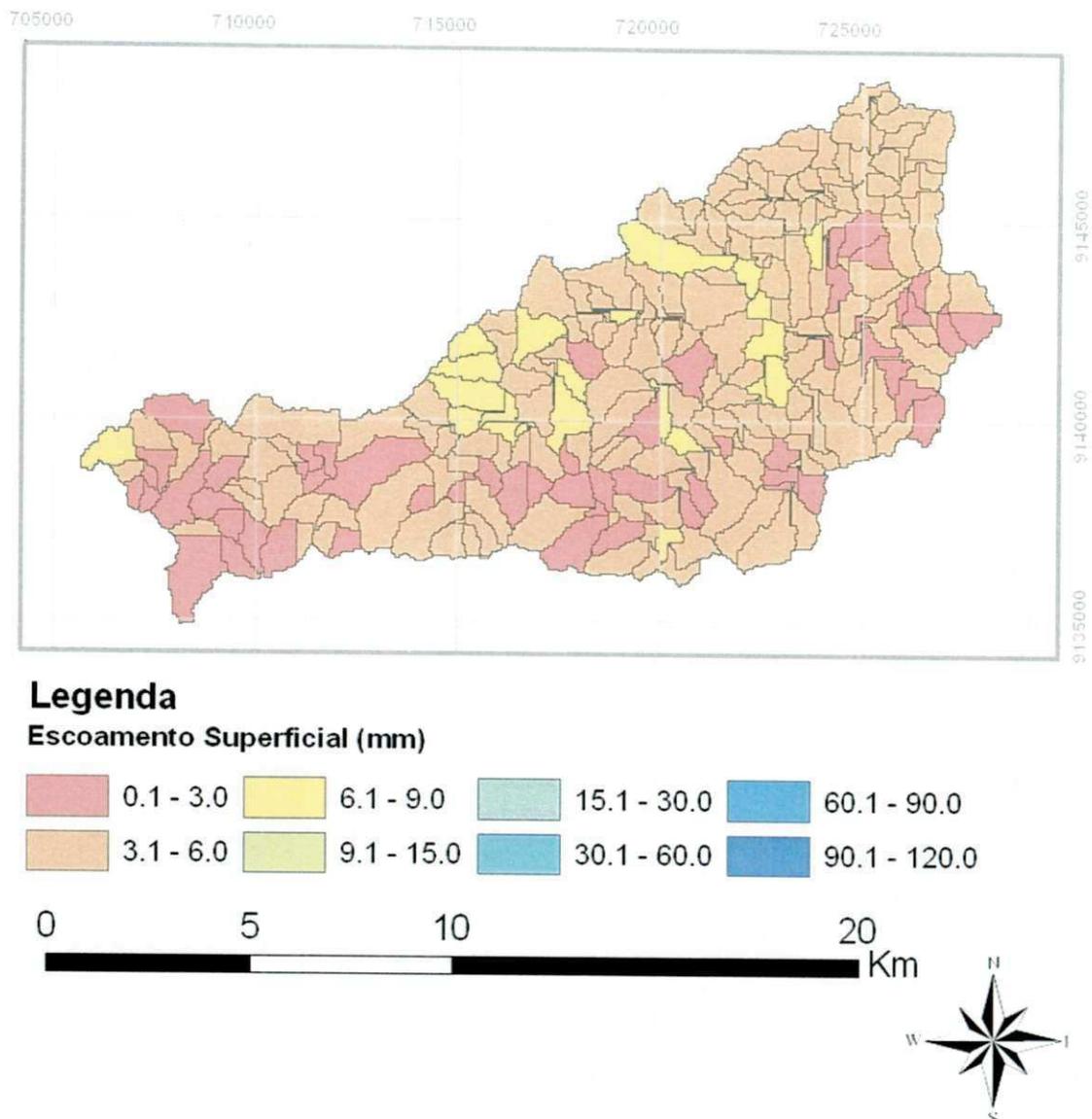


Figura 5.19 - Variação do escoamento superficial entre os Cenários 1 e 2.

Tabela 5.15 - Resumo das médias mensais para o Cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
Janeiro	26,10	0,00	0,27	0,27	23,69	0,00	179,25
Fevereiro	156,84	19,39	1,16	20,51	65,06	0,01	184,86
Março	212,63	30,18	1,65	31,77	111,26	0,01	227,91
Abril	144,44	11,52	1,56	13,04	88,89	0,01	162,29
Mai	48,11	0,23	0,8	1,03	65,6	0,00	179,07
Junho	45,44	0,08	0,51	0,59	37,58	0,00	219,15
Julho	49,51	2,08	0,58	2,64	30,70	0,00	92,04
Agosto	11,31	0,00	0,22	0,22	16,70	0,00	76,82
Setembro	9,54	0,00	0,17	0,18	11,96	0,00	76,81
Outubro	3,39	0,00	0,12	0,12	10,62	0,00	171,56
Novembro	5,27	0,00	0,1	0,10	5,71	0,00	162,74
Dezembro	41,00	5,77	0,34	6,10	21,97	0,00	181,37

Tabela 5.16 - Resumo das médias anuais para o Cenário 2

<b>Média anual</b>	
Precipitação (mm)	753,58
Escoamento Superficial (mm)	69,25
Fluxo Lateral (mm)	7,48
REVAP (mm)	185,35
Evapotranspiração (mm)	489,74
Evapotranspiração Potencial (mm)	1913,87
Aporte de sedimentos (t/ha)	0,030

### 5.5.3 Cenário 3

O cenário 3 foi simulado considerando uma intervenção antrópica extrema: toda a bacia coberta pelo cultivo de milho. Comparando com o Cenário 1 no mesmo período (fevereiro de 1988), observa-se neste cenário (Figura 5.20a) uma redução no escoamento superficial nas sub-bacias localizadas na parte inferior da BRS. Na análise por sub-bacia, constata-se que houve uma queda no volume escoado para aquelas que possuem solos do tipo Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico e Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico, ambos com permeabilidade muito rápida, o que reduz a possibilidade de escoamento.

Provavelmente a combinação entre o tipo de solo e o tipo de cultura adotada neste cenário tenha provocado a diminuição na taxa de escoamento nestas regiões, uma vez que o manejo do solo para este tipo de cultura pode ser realizado através do preparo convencional, significando o revolvimento das camadas superiores do solo. Em solos com textura média ou franco arenosa (Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico) ou com textura arenosa (Neossolo Flúvico Ta Eutrófico solódico) este processo de revolvimento pode favorecer ainda mais a infiltração da água no solo, reduzindo a taxa de escoamento superficial.

Com relação ao aporte de sedimentos, há uma variabilidade espacial, como pode ser observado na Figura 5.20b; praticamente todas as sub-bacias aumentaram a produção de sedimentos quando o uso do solo foi considerado cultivo de milho. Nesta condição, o fator P da MUSLE relacionado às práticas conservacionistas no manejo do solo foi considerado pelo modelo igual a 1, considerando, desta forma, que a BRS não apresenta tais práticas, o que favorece a erosão praticamente sem obstáculos. Cabe ressaltar que neste trabalho não se tem os dados do manejo utilizado na área de estudo, por isso os dados utilizados foram os do banco de dados do próprio modelo.

A caracterização do comportamento da bacia no Cenário 3 pode ser observada nas Tabelas 5.17 e 5.18.

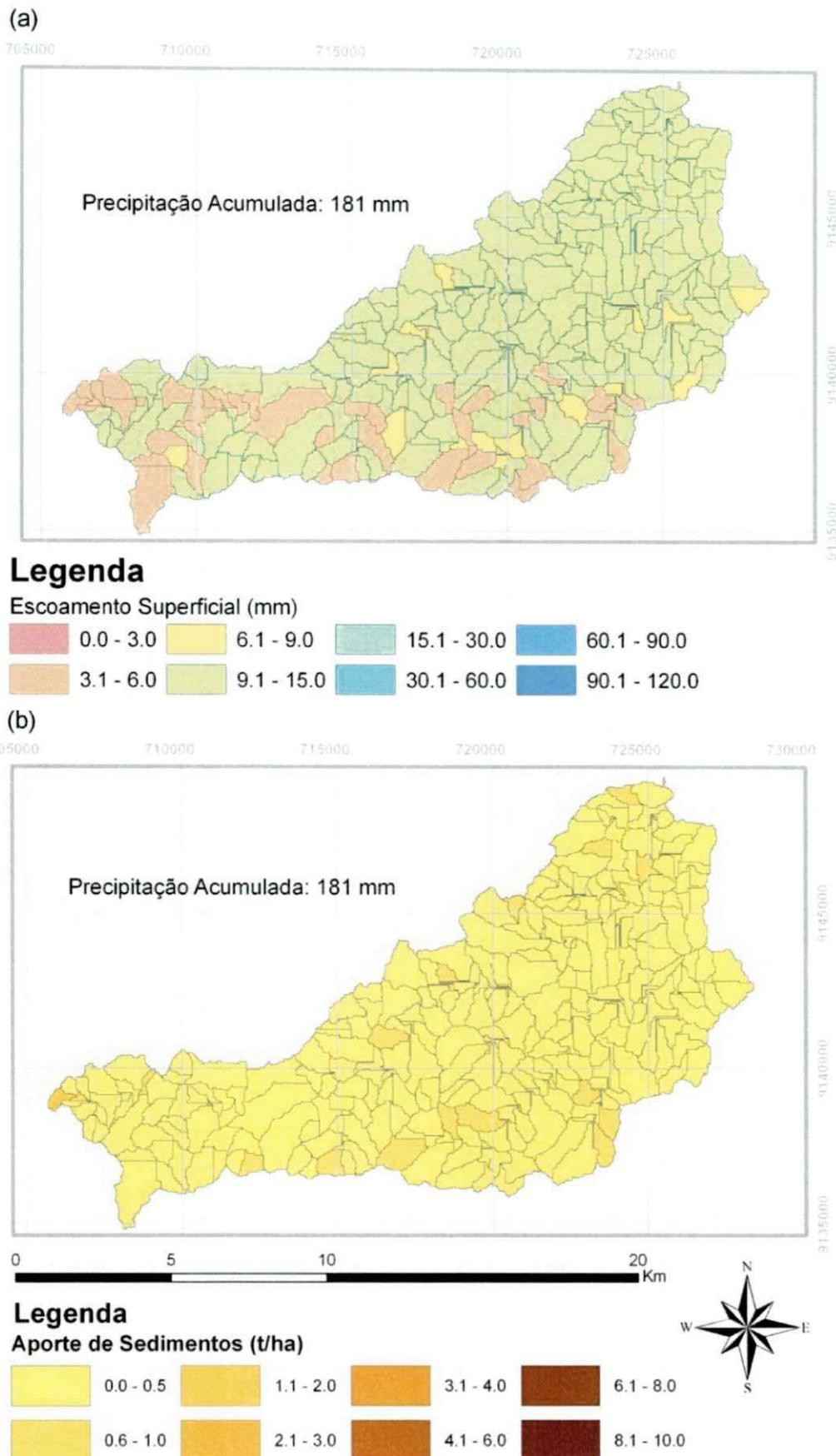


Figura 5.20 - Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário

Tabela 5.17 - Resumo das médias mensais para o Cenário 3 no período de 1985 a 1991

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Evapotranspiração Potencial (mm)
Janeiro	26,10	0,00	0,27	0,27	23,31	0,00	179,25
Fevereiro	156,84	17,98	1,15	19,1	75,53	0,76	184,86
Março	212,63	30,87	1,68	32,5	108,1	0,91	227,91
Abril	144,44	11,72	1,61	13,3	88,65	0,35	162,29
Mai	48,11	1,32	0,82	2,14	63,3	0,06	179,07
Junho	45,44	0,00	0,52	0,52	39,31	0,00	219,15
Julho	49,51	2,00	0,57	2,57	30,22	0,03	92,04
Agosto	11,31	0,00	0,22	0,22	16,8	0,00	76,82
Setembro	9,54	0,00	0,17	0,17	11,39	0,00	76,81
Outubro	3,39	0,00	0,12	0,12	10,01	0,00	171,56
Novembro	5,27	0,00	0,1	0,1	5,17	0,00	162,74
Dezembro	41,00	5,07	0,33	5,4	26,78	0,29	181,37

Tabela 5.18 - Resumo das médias anuais para o Cenário 3

<b>Média anual</b>	
Precipitação (mm)	753,58
Escoamento Superficial (mm)	68,96
Fluxo Lateral (mm)	7,56
REVAP (mm)	174,07
Evapotranspiração (mm)	498,57
Evapotranspiração Potencial (mm)	1913,87
Aporte de sedimentos (t/ha)	2,40

#### 5.5.4 Cenário 4

O cenário 4 também simula uma intervenção antrópica extrema, com cultivo de feijão em toda a área da bacia. Observa-se uma redução na taxa de escoamento superficial também na porção sudoeste da bacia que coincide com o solo Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, de permeabilidade muito rápida (Figura 5.21).

Analisando por sub-bacia, o aporte de sedimentos é maior naquelas cuja declividade é mais acentuada, o que influencia diretamente no fator LS da MUSLE; logo, estas sub-bacias estão localizadas na região sudoeste e próximo ao exutório da bacia. Este cenário apresentou a maior média anual do aporte de sedimentos em relação

aos demais. A caracterização do comportamento da bacia no Cenário 4 pode ser observada nas Tabelas 5.19 e 5.20.

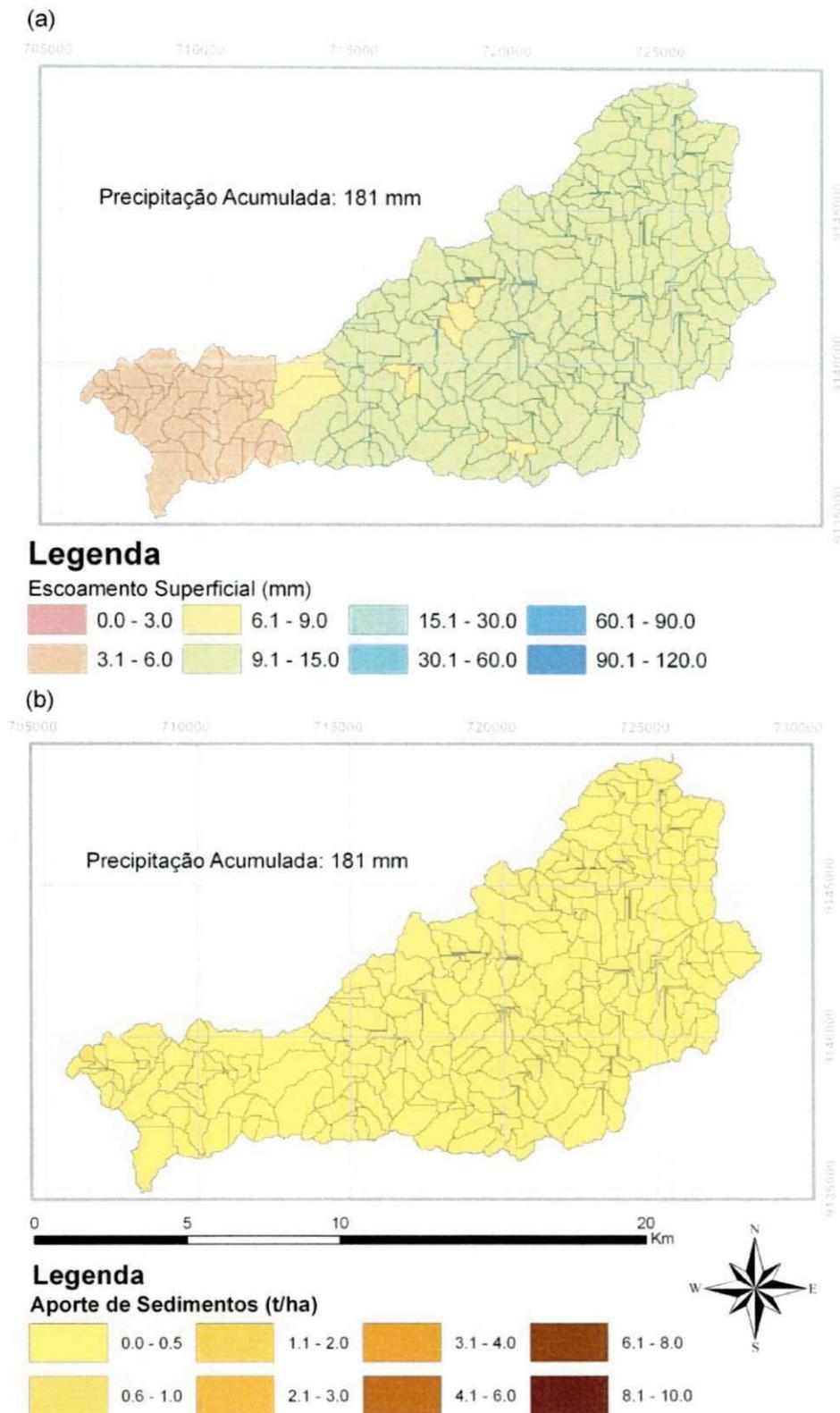


Figura 5.21 Escoamento Superficial (a) e Aporte de Sedimentos (b) para o mês de fevereiro de 1988 no Cenário 4

Tabela 5.19- Resumo das médias mensais para o Cenário 4 no período de 1985 a 1991

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Evapotranspiração Potencial (mm)
Janeiro	26,10	0,00	0,27	0,27	24,38	0,00	179,25
Fevereiro	156,84	18,05	1,15	19,17	72,43	1,08	184,86
Março	212,63	28,41	1,66	30,01	115,22	1,5	227,91
Abril	144,44	11,64	1,58	13,19	86,9	0,39	162,29
Mai	48,11	0,95	0,82	1,77	65,93	0,04	179,07
Junho	45,44	0,06	0,51	0,57	38,74	0,00	219,15
Julho	49,51	1,69	0,56	2,25	34,4	0,03	92,04
Agosto	11,31	0,00	0,21	0,21	16,14	0,00	76,82
Setembro	9,54	0,00	0,17	0,17	9,52	0,00	76,81
Outubro	3,39	0,00	0,12	0,12	9,53	0,00	171,56
Novembro	5,27	0,00	0,1	0,1	5,29	0,00	162,74
Dezembro	41,00	5,03	0,33	5,36	26,36	0,39	181,37

Tabela 5.20 - Resumo das médias anuais para o Cenário 4

Média anual	
Precipitação (mm)	753,58
Escoamento Superficial (mm)	65,83
Fluxo Lateral (mm)	7,48
REVAP (mm)	174,07
Evapotranspiração (mm)	504,84
Evapotranspiração Potencial (mm)	1913,87
Aporte de sedimentos (t/ha)	3,43

### 5.5.5 Cenário 5

Neste cenário, foi simulado um reflorestamento com vegetação nativa de toda a porção sudoeste da bacia, pois, como observado no cenário 2, este tipo de cobertura oferece as melhores condições de preservação dos recursos naturais.

A área escolhida para ser reflorestada está localizada na parte mais elevada da bacia hidrográfica, como também é a região com maiores intervenções antrópicas, com cultivo de milho e feijão em extensas áreas.

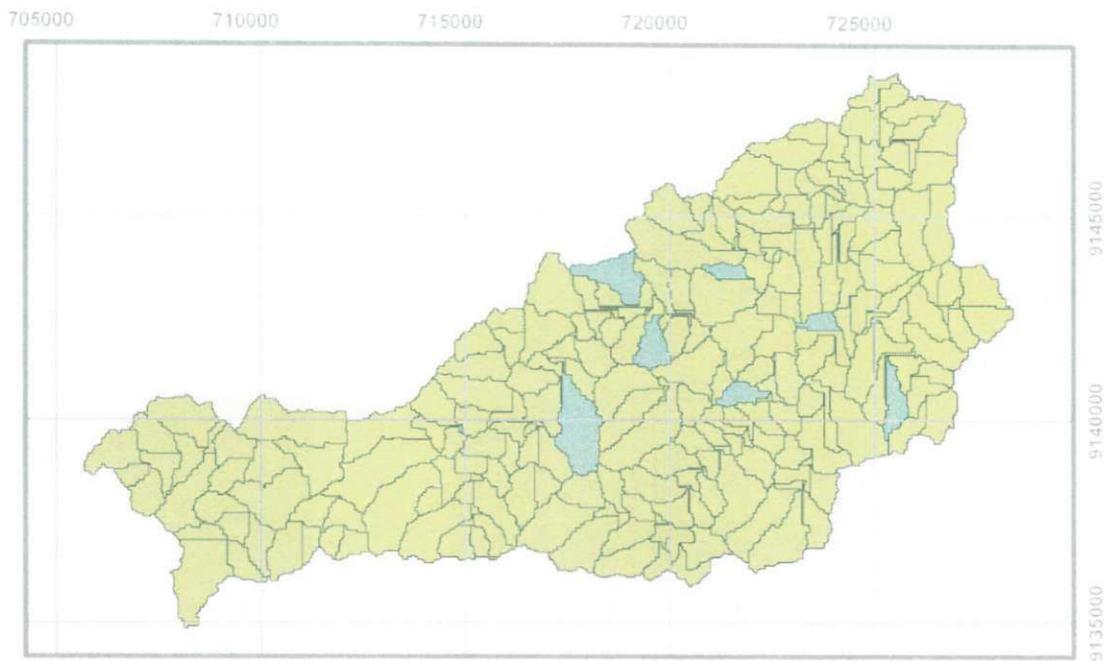
Observa-se um aumento discreto da taxa de escoamento superficial na BRS (Figuras 5.22 e 5.23), porém nota-se claramente o efeito do reflorestamento, onde

todas as 32 sub-bacias que compõem a região reflorestada apresentaram uma redução significativa no aporte de sedimentos (Figuras 5.24 e 5.25). A redução total do aporte de sedimentos para estas 32 sub-bacias entre os Cenários 1 e 5 foi 97,76% confirmando a importância da vegetação nativa na preservação do solo, a Tabela A.4 do Anexo apresenta o escoamento superficial e o aporte de sedimentos para os Cenários 1 e 5 no mês de fevereiro de 1988, as sub-bacias que compõem a porção reflorestada da bacia estão marcadas na tabela.

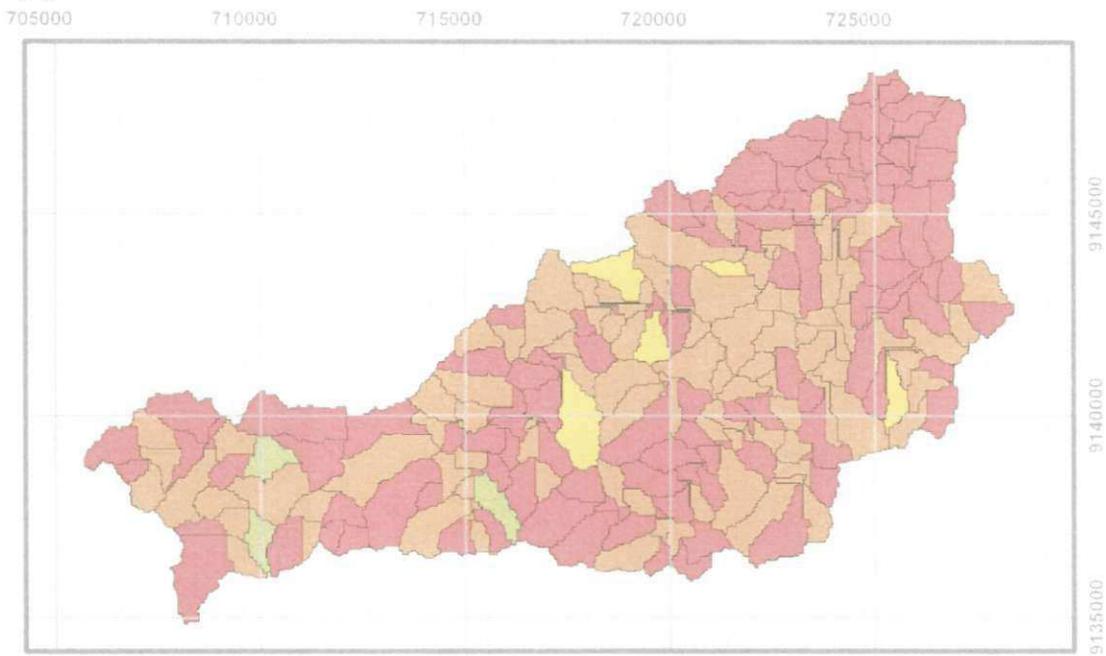
O fluxo superficial na região reflorestada é direcionado para a porção central da BRS, que se apresenta com relevo relativamente plano e algumas áreas agrícolas. Desta forma, um decréscimo nos sedimentos produzidos na área reflorestada favorece a agricultura localizada à jusante.

Comparando o Cenário 1 com o Cenário 5, de reflorestamento, observa-se que a vegetação nativa diminuiu o processo erosivo na bacia, uma vez que, diretamente, ela altera os parâmetros de infiltração e de proteção do solo. A caracterização do comportamento da bacia no Cenário 5 pode ser observada nas Tabelas 5.21 e 5.22.

(a)



(b)



0 5 10 20 Km



### Legenda

#### Escoamento Superficial (mm)

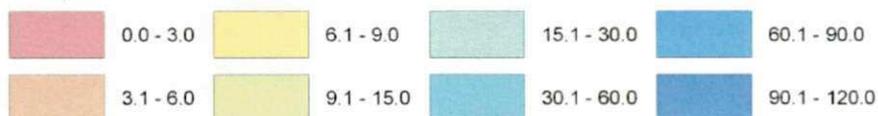


Figura 5.22 - Escoamento superficial para o cenário 5 no ano de 1986 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Abril

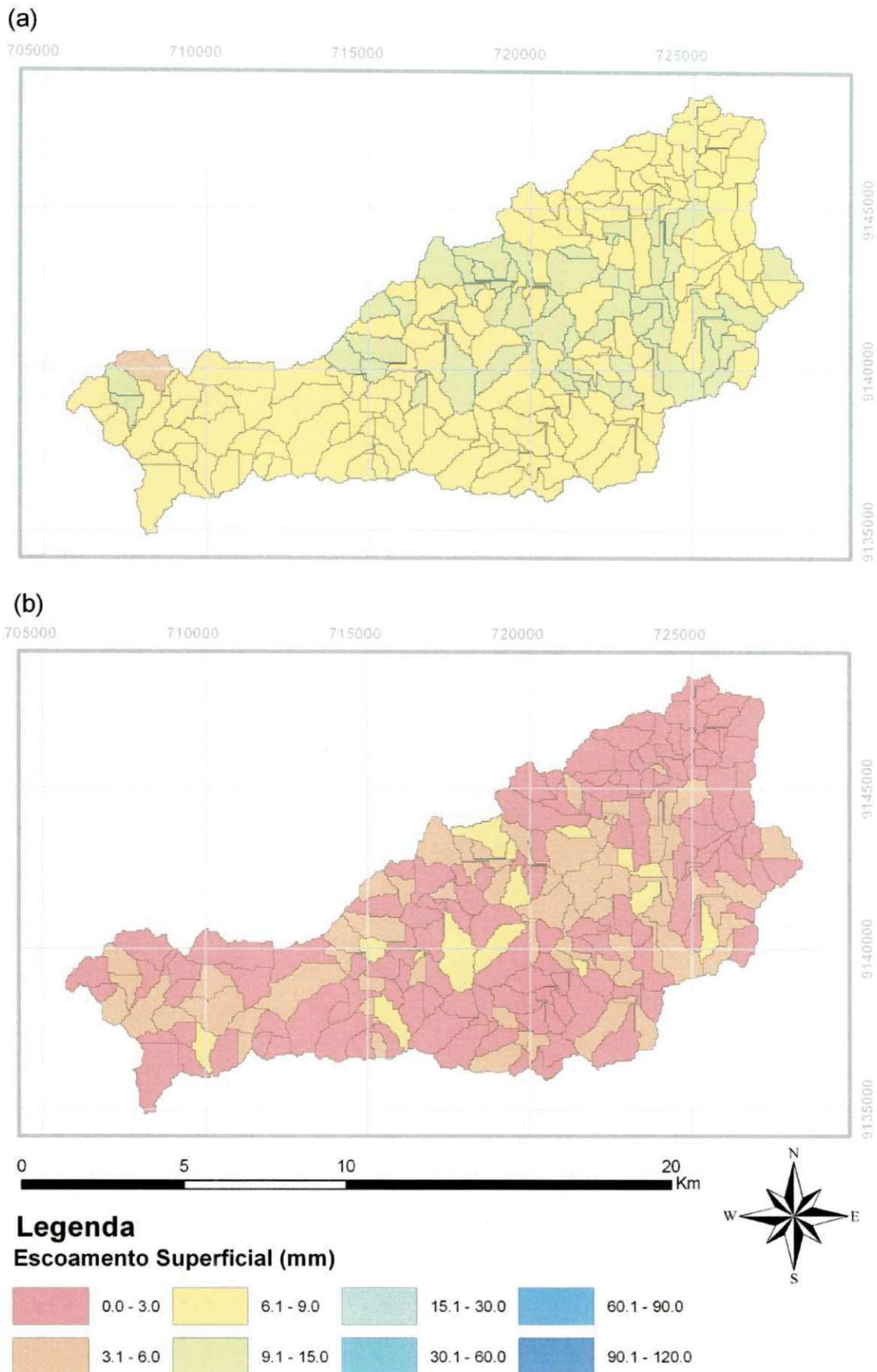


Figura 5.23 - Escoamento superficial para o cenário 5 no ano de 1988 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Março

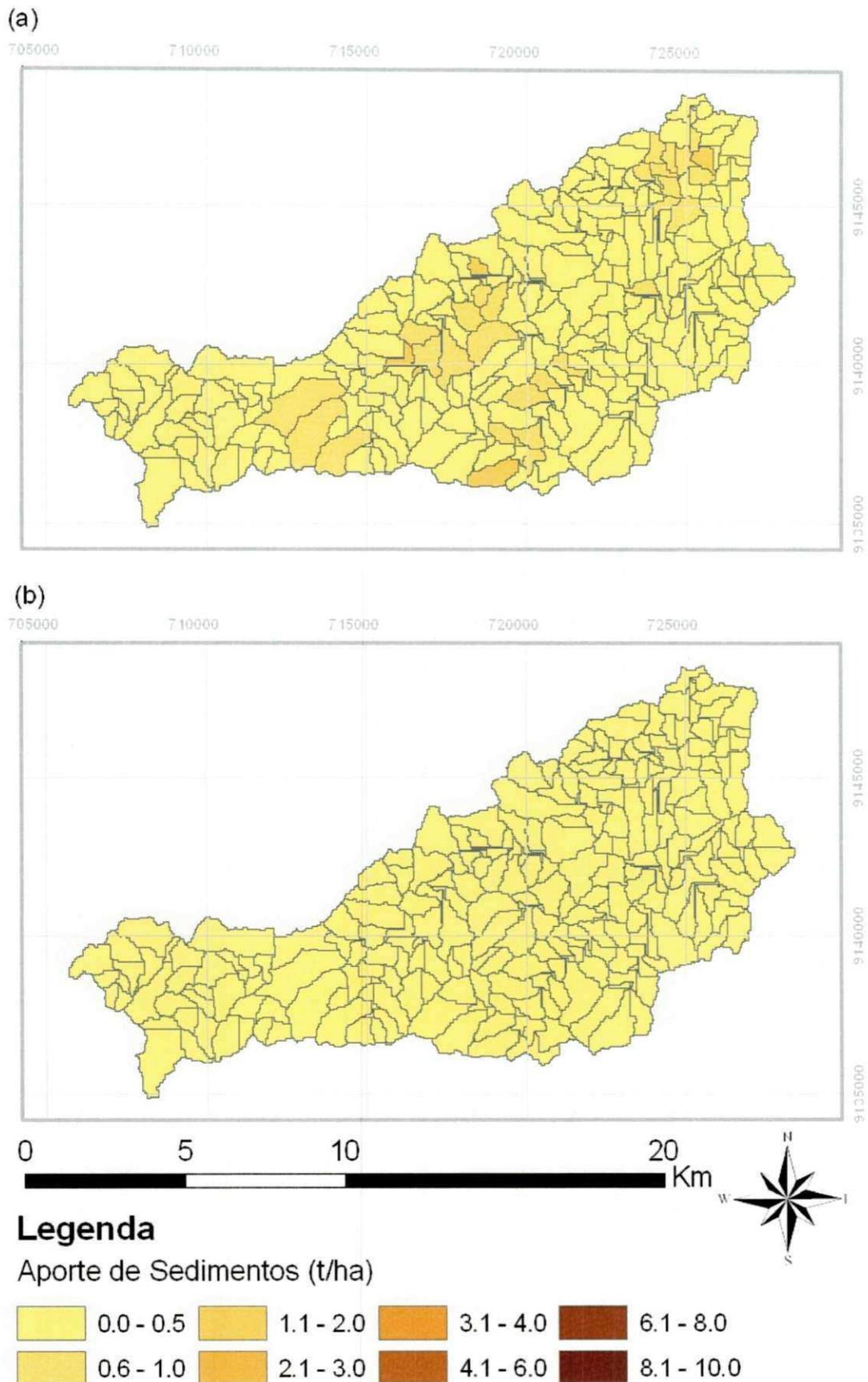


Figura 5.24 - Aporte de sedimentos para o cenário 5 ano de 1986 nos meses de: (a) Fevereiro e (b) Abril

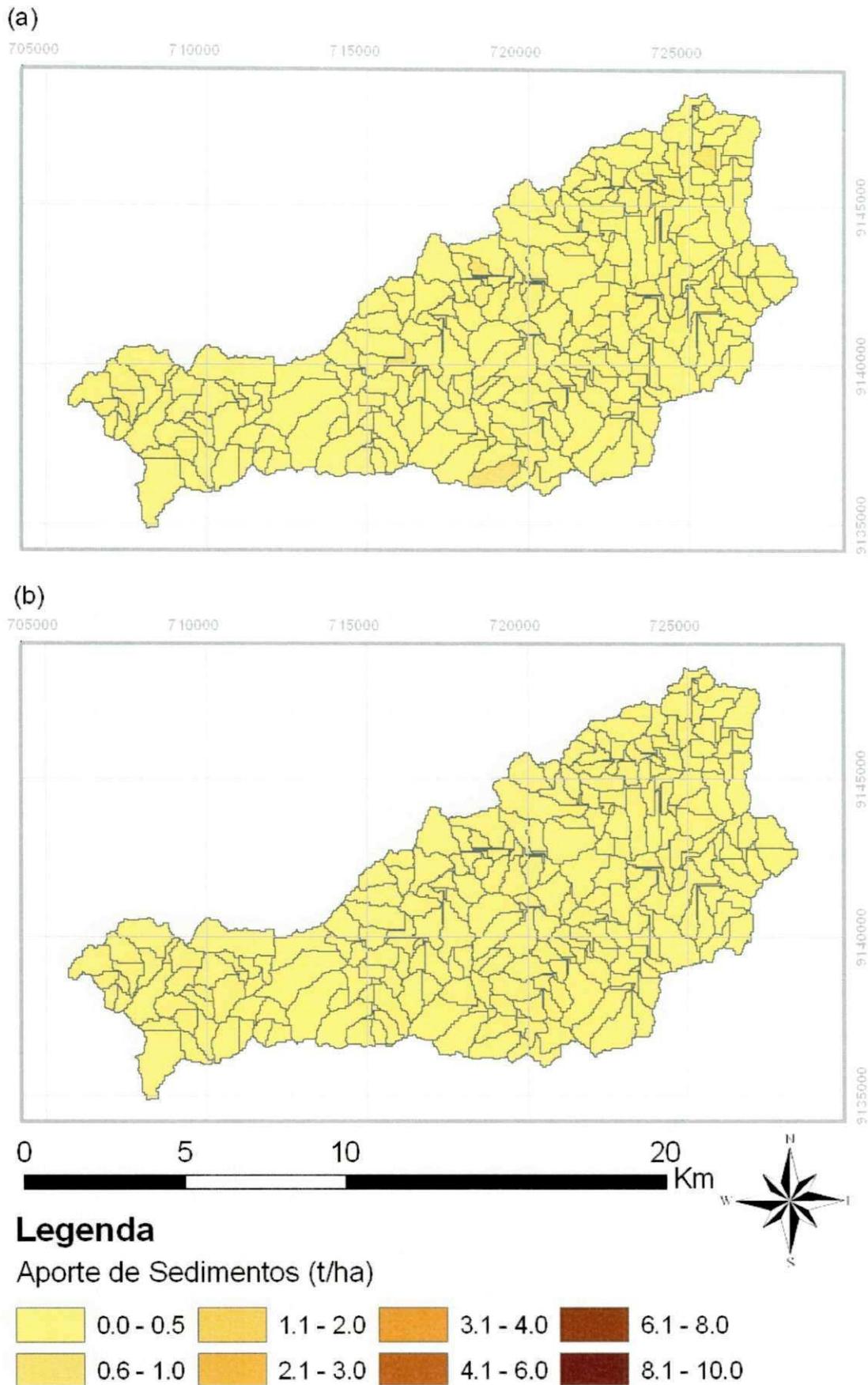


Figura 5.25 - Aporte de sedimentos para o cenário 5 no ano de 1988 nos meses de: a) Fevereiro e b) Março

Tabela 5.21- Resumo das médias mensais para o Cenário 5 no período de 1985 a 1991

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Evapotranspiração Potencial (mm)
Janeiro	26,1	0,00	0,24	0,24	24,62	0,00	225,55
Fevereiro	156,84	12,29	1,12	13,38	60,97	0,15	205,73
Março	212,63	26,03	1,63	27,61	89,00	0,29	221,62
Abril	144,44	6,44	1,54	7,95	81,96	0,04	179,32
Mai	48,11	0,18	0,76	0,94	55,18	0,00	190,37
Junho	45,44	0,43	0,48	0,9	32,69	0,01	152,62
Julho	49,51	1,25	0,53	1,77	39,94	0,01	155,59
Agosto	11,31	0,00	0,21	0,21	11,98	0,00	164,59
Setembro	9,54	0,00	0,17	0,17	7,99	0,00	178,71
Outubro	3,39	0,00	0,12	0,12	3,81	0,00	215,65
Novembro	5,27	0,00	0,1	0,1	4,24	0,00	216,52
Dezembro	41,00	3,83	0,32	4,14	21,71	0,05	223,24

Tabela 5.22 - Resumo das médias anuais para o Cenário 5

<b>Média anual</b>	
Precipitação (mm)	753,58
Escoamento Superficial (mm)	50,45
Fluxo Lateral (mm)	7,22
REVAP (mm)	174,07
Evapotranspiração (mm)	434,09
Evapotranspiração Potencial (mm)	2323,51
Aporte de sedimentos (t/ha)	0,55

### 5.5.6 Síntese dos Cenários

Comparando os resultados das simulações dos 5 cenários de uso do solo, não houve uma alteração significativa do escoamento superficial se comparadas as médias anuais. Contudo, observa-se um aumento discreto do escoamento superficial e redução bastante significativa da produção de sedimentos no Cenário 5, de reflorestamento, em relação ao Cenário 1 para a maioria das sub-bacias; porém, para o Cenário 2, o resultado da produção de sedimentos foi ainda menor. Os Cenários 3 e 4 apresentaram os maiores valores no aporte de sedimentos em relação aos demais.

A Tabela 5.23 apresenta o resumo das médias anuais de escoamento superficial, aporte e produção de sedimentos para todos os cenários. Como esperado, o Cenário 2, na qual toda a bacia se mantém preservada, é a condição ideal do ponto de vista hidrológico. As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam as médias mensais do escoamento superficial e do aporte de sedimentos para todos os cenários. Observa-se que o escoamento superficial médio mensal foi reduzido nos Cenários 1 e 5 para todos os meses. Com relação ao aporte de sedimentos médio mensal, claramente é observada a elevada taxa para o Cenário 4, com exceção apenas dos meses de maio e julho, nos quais o Cenário 3 se apresentou com maior aporte, sendo que nestes meses a intensidade pluviométrica não é elevada se comparado com o restante do período chuvoso para a região.

Os Cenários 2, 3 e 4, nos quais toda a área da bacia foi considerada coberta por vegetação nativa, milho e feijão, respectivamente, aproximaram-se no escoamento superficial, porém o aporte de sedimentos mostra uma diferença bastante significativa. Isto se deve principalmente ao Fator de Uso e Manejo do Solo (C) presente no banco de dados do modelo para cada um desses usos, onde foi considerado  $C = 0,2$  para o cultivo de milho e feijão e  $C = 0,03$  para a vegetação do tipo "Range Brush", neste caso representando a caatinga. Cabe lembrar que este fator pode variar de 0 a 1, sendo que 0 representa um solo protegido e 1 um solo sem proteção.

Os Cenários 3 e 4, apesar de possuírem o mesmo valor para o Fator de Uso e Manejo do Solo, apresentaram comportamento distinto quanto ao aporte de sedimentos na BRS, visto que no Cenário 2, com toda a bacia coberta por cultivo de milho, o aporte de sedimentos foi de 2,40 t/ha e no Cenário 3, na qual a bacia foi simulada tendo toda a sua área coberta pelo cultivo de feijão, o aporte de sedimentos foi de 3,43 t/ha.

Cabe ressaltar que a simulação desses cenários foi realizada utilizando diretamente o banco de dados de culturas do modelo SWAT, sendo que há diferenças importantes nas características de tais culturas anuais que estão relacionadas com a proteção que as mesmas proporcionam ao solo.

Bertoni e Lombardi Neto (2005) analisaram o efeito das diferentes culturas anuais nas perdas por erosão, inclusive para as culturais de milho e feijão. Os resultados obtidos permitiram constatar que há considerável diferença entre as perdas obtidas para cada tipo de cultura. O cultivo de feijão apresentou maior perda de solo em relação ao cultivo de milho, evidenciando o comportamento dos diferentes tipos de culturas anuais no processo de erosão.

Por fim, comparando os Cenários 1 e 5, pode-se perceber um aumento, embora discreto, no escoamento superficial, mas principalmente, a redução no aporte de sedimentos e produção de sedimentos no Cenário 5 em relação ao Cenário 1. Diante de tal situação, confirma-se a viabilidade de reflorestamento e proteção da porção nordeste da bacia, com a finalidade de maximizar a produtividade das terras agrícolas a jusante, a fim de que o uso do solo na BRS possa ser conduzido em bases conservacionistas.

Tabela 5.23 - Resumo das médias anuais de escoamento superficial, aporte e produção de sedimentos para todos os cenários

<b>Média Anual</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
Escoamento Superficial (mm)	49,32	69,25	68,96	65,83	50,45
Aporte de Sedimentos (t/ha)	0,86	0,03	2,40	3,43	0,55
Produção de sedimentos (ton)	15,42	5,76	29,91	30,58	10,25

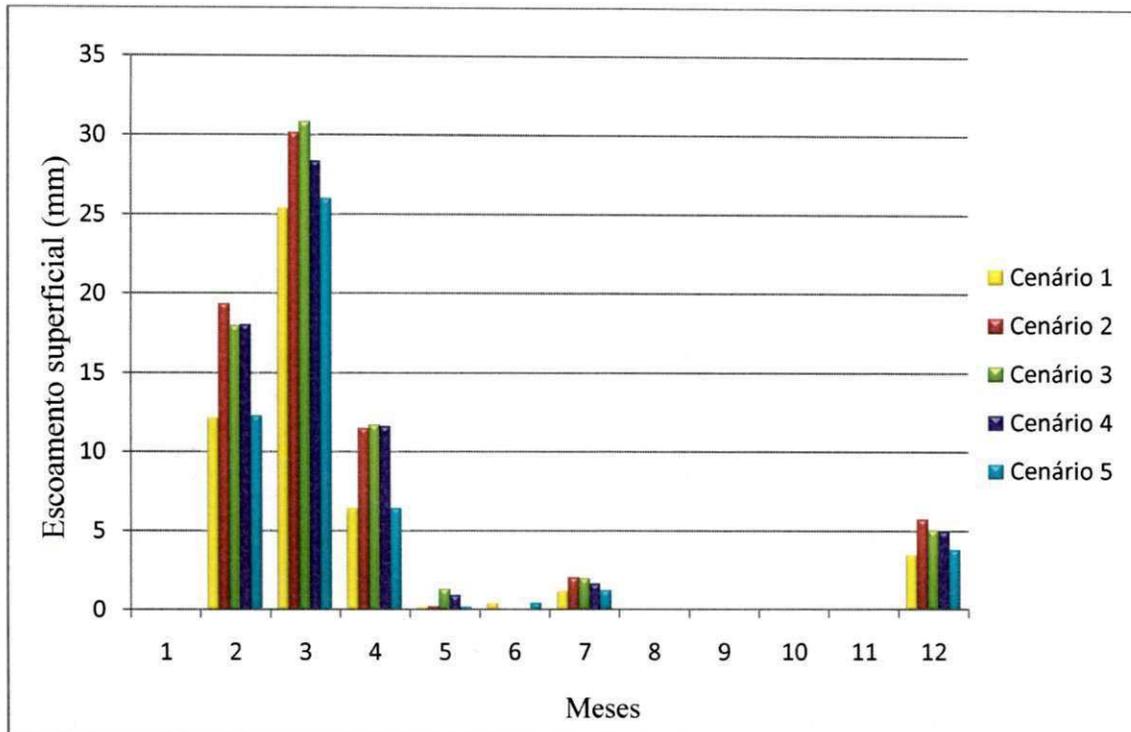


Figura 5.26 – escoamento superficial médio mensal para os cenários

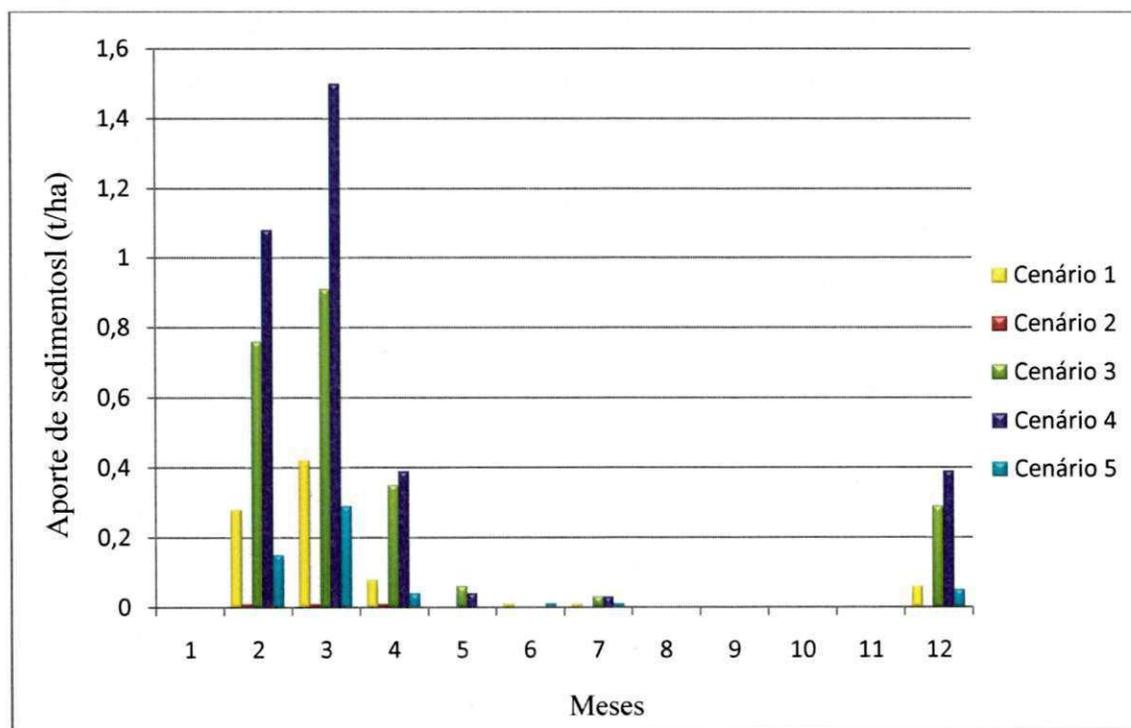


Figura 5.27 - Aporte de sedimentos médio mensal para os cenários

## **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

---

O modelo SWAT foi a ferramenta utilizada na Bacia Representativa de Sumé com o intuito de analisar os processos hidrossedimentológicos sob a perspectiva de diferentes cenários, sendo possível propor modificações na cobertura da bacia a fim de garantir o uso sustentável dos seus recursos.

Os resultados obtidos para o escoamento superficial com o modelo parametrizado apresentaram-se satisfatórios quando analisados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) tanto para os escoamentos médios mensais quanto para os eventos individuais. Algumas discrepâncias encontradas entre os valores observados e simulados podem estar relacionadas com a utilização do Método da Curva Número para estimar o escoamento superficial, o qual não leva em consideração a intensidade e a duração da chuva, mas apenas o volume diário precipitado. Entretanto, este fato não impediu que o modelo obtivesse bons resultados nas simulações do escoamento superficial.

Com relação à produção de sedimentos, apesar da inexistência de dados observados, a comparação dos resultados modelados pelo SWAT com aqueles encontrados por Lopes (2003) com o modelo KINEROS2, apontou uma superestimação na produção de sedimentos. Constatou-se que a determinação do fator topográfico da MUSLE, equação utilizada para estimar a perda de solo no modelo, não considera as características geomorfológicas da bacia, não contabilizando, assim, pontos de deposição.

O modelo foi sensível às mudanças de cenário de uso do solo e possibilitou identificar áreas de maior vulnerabilidade ambiental, como áreas com declividade acentuada, com classes de solos consideradas susceptíveis a erosão e culturas que favorecem o processo erosivo. Os resultados obtidos possibilitaram observar a necessidade de reconhecer nas bacias hidrográficas as áreas sensíveis aos processos erosivos, onde são necessárias práticas de controle a erosão, ou mudança na cobertura do solo.

O Cenário 2, que representou a bacia preservada, é a condição ideal do ponto de vista hidrológico. Porém, como a bacia já possui áreas com intervenções antrópicas bastante acentuadas, simuladas no Cenário 1, a proposta de reflorestamento, apresentada no Cenário 5, é uma alternativa plausível no planejamento conservacionista da Bacia Representativa de Sumé. Os Cenários 3 e 4, que simularam uma intervenção extrema na

bacia com toda a sua área coberta por milho e feijão, respectivamente, apresentaram os maiores valores no aporte e produção de sedimentos apontando a deficiência deste tipo de cultura em proteger o solo contra os processos erosivos, haja vista os valores determinados pelo modelo para o fator C de uso e manejo do solo para os mesmos.

Com relação à utilização do modelo, o seu acoplamento à ferramenta SIG permite a espacialização de diversas características da bacia, bem como dos resultados apresentados nas simulações. Estes mapas de variação espacial auxiliam o processo de tomada de decisão e conseqüentemente o planejamento de bacias hidrográficas.

Assim como recomendou Carvalho (2011), é importante a elaboração de um banco de dados para a cobertura do solo do tipo caatinga em diferentes estágios de crescimento e densidade, atentando para os parâmetros mais sensíveis nos processos hidrossedimentológicos.

Considera-se a recomendação de um levantamento detalhado do uso do solo da bacia, que permita a simulação de um cenário atual. Também deve ser considerada em estudos futuros de simulação de cenários, a calibração por sub-bacias, utilizando unidades experimentais da Bacia Experimental de Sumé que possuem uma série de dados observados de escoamento superficial e produção de sedimentos, que permitiriam uma simulação mais confiável de cenários em função de mudanças de uso e ocupação do solo. A aplicação do modelo em parcelas experimentais e microbacias realizar-se-á através da utilização das HRUs que as compusessem, uma vez que, no modelo SWAT os resultados também são apresentados por Unidade de Resposta Hidrológica e sub-bacias.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho podem servir de base para análise de manejos alternativos, visando à redução do impacto das atividades antrópicas em bacias hidrográficas e dando suporte ao planejamento do uso e manejo da bacia em bases conservacionistas.

---

**CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- ALMEIDA, D. F. F.; LOPES, R. L.; RUFINO, I. A. A. (2011). **Classificação automática do uso do solo como instrumento de apoio à gestão das águas subterrâneas na bacia sedimentar costeira da Paraíba**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR), Curitiba. Anais. São José dos Campos: INPE, 3979-3986 p.
- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S. (2001). **Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB)**. In: Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, p. 121-128
- ARABI, M.; FRANKENBERGER, J. R.; ENGEL, B. A.; ARNOLD, J. F. (2008). **Representation of agricultural conservation with SWAT**. Hydrological Processes. Vol. 22, 3042-3055 p.
- ARAGÃO, R. (2000). **Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com 9os Dados da Bacia Experimental de Sumé – PB**. Dissertação (Mestrado), PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V.S.; LOPES, W.T.A.; SILVA, A.F. (2002). **Avaliação do Modelo CHDM Utilizando Dados de uma Bacia Experimental no Semiárido Nordeste**. In: Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió: ABRH, v. 1.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. (1998). **Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development**. Journal of the American water Resources Association, v. 34, n.1, p.73- 89.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. (2000) **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin**. Journal of Hydrology, v.227, p.21-40.
- ASSAD, M. L. L.; ALMEIDA, J. (2004) **Agricultura e Sustentabilidade: Contexto, Desafios e Cenários**. Ciência & Ambiente, n. 29, p.15-30.
- BAGNOLD, R. A. (1977). **Bedload transport in natural rivers**. Water Resources Research, v.13,p.303-312.
- BALDISSERA, G. C. (2005), **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT(Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, 144 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2005). **Conservação dos solos**. 5ª Ed. São Paulo: Coleção Brasil Agrícola, Ícone Editora. 355p.

- BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y.A.; GRIENSVEN, A. V. e SRINIVASAN, R. (2011) **Sediment management modeling in the Blue Nile Basin using SWAT model.** Hydrology and earth System Sciences. Volume 15, 807-818 p.
- BLAINSKI, E.; ARAUJO, I. S.; MELLO, M.F.; BORGES, R. C. (2011). Sistema de monitoramento e previsão hidrológica do rio Araranguá – SC. In: IXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Maceió, AL.
- BONUMÁ, N.B.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.; BARROS, C.A.P.; RODRIGUES, M.F.; BUARQUE, D.C. (2011). **Simulação da vazão e da produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT.** In: Lima, J. E. F. W. e Lopes, W. T. A. (orgs.). Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. ABRH, Brasília, DF. Volume 1, 323 – 344 p.
- BRADY, N. C.(1989) **Natureza e propriedades dos solos.** 7ª edição, São Paulo: F. Bastos.
- BRANDT, C. J. (1986) **Transformation of the kinetic energy of rainfall with variable tree canopies.** (PhD Thesis in Water Resources) – London University, London, 446p.
- BRASIL (1997). **Lei Federal nº. 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Senado, Brasília.
- BRASIL (1965). **Lei Federal nº. 4771 de 15 de setembro de 1965. Institui o Novo Código Florestal.** Senado, Brasília.
- BRASIL, Ministério da Agricultura (1972) . **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba.** Rio de Janeiro; Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (MA), 670p.
- BRUIJNZEEL, L. A. (1990). **Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of knowledge review.** Amsterdam: IHP – IAHS - UNESCO, 224p.
- CADIER, E.; FREITAS, B.J, (1982), **Bacia Representativa de Sumé: Primeira Estimativa dos Recursos de Água,** Recife, SUDENE.
- CADIER, E.; FREITAS, B. J. e LEPRUN J. C. (1983). **Bacia Experimental de Sumé - PB: Instalação e Primeiros Resultados.** Recife, SUDENE, 87p.
- CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. (2006). **Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba.** Revista de Biologia e Ciência da Terra. Vol. 6, nº 1, 45-50pp.

- CARVALHO, N. de O. (2008). **Hidrossedimentologia prática**. Interciência. 2ª Edição. Rio de Janeiro. 600p.
- CARVALHO NETO, J. G. (2011). **Simulação hidrossedimentológica da bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado) PPGECA/CCT/UFMG, Campina Grande.
- CHOW, V.T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. Mac Graw-Hill Book Co., New York.
- CHU, T.W.; SHIRMOHAMMADI, A.; MONTAS, H.; ABBOTT, L.; SADEGHI, A. (2005). **Watershed level BMP evaluation with SWAT model**. In: ASAE ANNUALINTERNATIONAL MEETING, Saint Joseph.
- CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. (2010). **Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model**. Hydrological Process, vol 24, pp 1133- 1148.
- CIRILO, J.A.; CAMPELLO NETTO, M.S.C.;MONTENEGRO, S.M.G.L.; ASFORA,M.C. (2007). **Caracterização do Semi-Árido Brasileiro**. In: CIRILO, J.A.; CABRAL, J.J.S.P.;FERREIRA, J.P.C.L.; OLIVEIRA, M.J.P.M.; LEITÃO, T.E.; MONTENEGRO, S.M.G.L.;GÓES, V.C (orgs) O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semi-áridas. Editora Universitária da UFPE, Recife, 33-60p.
- COELHO NETTO, A. L (2001). **Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia** In: GUERRA A. J. T.; CUNHA S. B (orgs): Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- COOKE, R.U.; DOORNKAMP, J.C. (1990). **Geomorphology in environmental management**. Oxford: Clarendon.
- CUNHA, S. B. (2001). **Geomorfologia Fluvial**. In: Guerra A. J. T.; Cunha S. B (orgs): **Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- CUNHA, J. E. B. L.; TAVEIRA, I.M.L.M.; ALMEIDA FILHO, D. F.; SILVA, A. R.S.; Rufino, I. A. A.(2011). Dinâmica interanual da cobertura do solo em região semiárida utilizando sensores orbitais. In: IXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Maceió, AL.
- DUTRA, K de R.; TEIXEIRA, E. C.; MENDONÇA, A. S. F.: **Determinação da estimativa de perda de solo por erosão superficial em bacia hidrográfica utilizando Sistema de Informações Geográficas – SIG**. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES. Foz do Iguaçu, RJ.

- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (1999). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília. 412 p.
- FELGUEIRAS, C.A. (1998). **Modelagem Numérica de Terreno**. In: Introdução ao SIG, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 7.1-7.38p.
- FERNANDES, A. R.; DE LIMA, H. V. (2009) **Introdução ao estudo da conservação do solo**. Apostila, Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto de Ciências Agrárias. Belém, PA.
- FERNANDES, A. R.; REIS, I. N. R. S. ; NORONHA, N. C. (2010) . **Estado nutricional de pomares de laranja submetidos a diferentes manejos do solo**. Revista de Ciências Agrárias, v. 1, p. 52-58.
- FERRIGO, S.; MINOTI, R.; KOIDE, S. (2011) **Utilização do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na estimativa de produção de sedimentos decorrentes de diferentes cenários de uso do solo na bacia do Córrego Capão Comprido no Distrito Federal**. In: IXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, Maceió, AL.
- FIGUEIREDO, E. E. (1998a). **Estimativa de Parâmetros Físicos do Solo da Bacia Representativa de Sumé com Base na Textura**. In: IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande, Paraíba, ABRH.
- FIGUEIREDO, E. E. (1998b). **Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-arid Region of Brazil**. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK.
- FIGUEIREDO, E. E. ; PARSONS, A. J. (2010). **Incorporating pedotransfer functions into the MOSEE model to simulate runoff and soil erosion at different scales**. In: Sediment Dynamics for a Changing Future, Varsovia. Sediment Dynamics for a Changing Future. IAHS Publ. Wallingford, UK. IAHS Press, p. 353-360.
- FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. (1995). **USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**. NSERL Report. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.
- GOMES, M.; RODRIGUES, R. (1998). **Modelação hidrológica distribuída: aplicação à bacia do Guadiana**. Congresso da Água, Lisboa.
- GOTTSCHALK, L.; BATCHVAROVA, E.; GRYNING, S. E.; LINDROTH, A.; MELAS, D.; MOTOVILOV, Y. U. G.; FREEH, M.; HEIKINHEIMO, M.;

- SAMUELSSON, P.; GRELLE, A.; PERSSON, T. (1999) **Scale aggregation: Comparison of flux estimates from NOPEX**. Journal of Agricultural and Forest Meteorology, v.98-99, p.103-120.
- GOVENDER, M.; EVERSON C.S. (2005). **Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model**. Hydrological Processes, Chichester, v. 19, p. 683-692.
- GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M.; (1999) **Erosão e conservação dos solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 340.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B. ( 2001): **Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos**. 4ª edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. (2004) **Erosão dos Solos e a Questão Ambiental**. In: GUERRA, A. J. T. e VITTE, C. A. (orgs.).Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2004, p. 225-251
- GREEN, G. H.; GRIENSVEN, A. (2008). **Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds**. Environmental Modelling and Software. Vol. 23,422-434 pp.
- JAKEMAN, A.J.; GREEN, T.R.; BEAVIS, S.G.; ZHANG, L.; DIETRICH, C.R.; CRAPPER, P.F. (1999). **Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment**. Hydrological Processes, Chichester, v. 13, n. 5, p. 745-752.
- JHA, M., GASSMAN, P. W., SECCHI, S., GU, R., ARNOLD, J. (2004). **Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, And Nutrients Predictions**. Journal of the American Water Resources Association, 811-825 pp.
- KING, K.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; SRINIVASAN R. (1996) **Soil and Water Assessment Tool – SWAT**. Texas: USDA, Agricultural Research Service, 1996. 450p
- HILLEL, D. (2004). **Introduction to Environmental Soil Physics**. Elsevier Academic Press, 494 pp.
- HUDSON, N. (1995). **Soil Coservation**. Redwood Books, Trowbridge. 3º Edição, Londres.
- LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G. R.; LAFLEN, J.M. (1992) **Development and application of modern soil erosion prediction technology**. Australian Journal of Soil Ressearch, v.30, n.6, p. 893-912.

- LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J.(1999). **Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation.** Water Resources Research, v.26, n.1, p.69-86.
- LIERSCH, S. (2003a) **The Program pcpSTAT: user's manual.** Berlin.
- LIERSCH, S. (2003b). **The Programs dew.exe and dew02.exe: user's manual.** Berlin.
- LIMA, E. R. V. (2003). **Erosão do solo: fatores condicionantes e modelagem matemática.** In: Cadernos do LOGEPA - Laboratório e Oficina de Geografia da Paraíba, Ano 2 , n. 1, p.17.
- LIMA, J.R. de; RODRIGUES, W. **Estratégia de combate à desertificação.** Módulo 18. Campina Grande:UFCG/ABEAS, 2005, 55p.
- LOPES, N. H. Y. (2008). **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- LOPES, V. L. e LANE, L. J. (1987). **Um modelo computacional de simulação hidrológica.** In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, ABRH, Vol. 2, p. 481-494.
- LOPES, W. T. A. (2003). **Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba.** Dissertação (Mestrado), PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- MACHADO, R.E. (2002). **Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma Microbacia Hidrográfica utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento.** Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- MACHADO, R. E. ; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. (2003). **Simulação de Escoamento em uma Microbacia Hidrográfica utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1, p. 147-155.
- MAIDMENT, D, R. (1993). **Hydrologic Cycle.** In: Handbook Of Hydrology. McGraw-Hill, 2ªEd, 1.1-15p.
- MELO, H. de A. (2010). **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica.** Dissertação (Mestrado). PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande, 119p.

- MENDES, C.A. (1996). **Integração de modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas: fundamentos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 1, 47-66p.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1972). **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Convênio de mapeamento de solos MA/ EPE-SUDNE. Rio de Janeiro.
- MORO, M. (2005). **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, 100p.
- NASA – CASA Project . Disponível em: <http://geo.arc.nasa.gov/sge/casa/swat.html>. Acessado em: 15 de abril de 2011.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2011). **Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation version 2009**. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005). **Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation version 2005**. Temple, Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 494p.
- NOUVELOT, J. F. (1974) **Planificação da implantação de bacias representativas. Aplicação à área da SUDENE**. Recife, SUDENE/ ORSTOM, 91p.
- OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO, D. F. (2000). **Estimativa das Equações de Chuvas Intensas para Algumas Localidades no Estado de Goiás Pelo Método da Desagregação de Chuvas**. Pesquisa Agropecuária Tropical. Vol. 20. pp 23- 27.
- PEREIRA, D.D. (2008). **Cariris paraibanos: do sesmarialismo aos assentamentos de reforma agrária. Raízes da desertificação?** Dissertação (Mestrado) Programa De Pós-Graduação em Recursos Naturais, Campina Grande.
- PORTO, R.M. (2006). **Hidráulica Básica**. Editora EESC –USP, Projeto REENGE, São Carlos. 4º Edição, 519p.
- PRUSKI, F.F. (2009) Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F.F. (org.) **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Editora UFV, 2º Edição, 40-73p.
- RAUDIKIVI, A. J. (1976). **Loose Boundary Hydraulics**. Pergamon International. 2ª Edição. 397p.

- RAWLS, W.J.; SAXTON, K.E. (1982). **Estimation of Soil Water Properties**. American Society of Civil Engineering. Journal of Irrigation and Drainage. 25(5), 1316-1320,p.
- RENNÓ, C. D. (2003) **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado). São José dos Campos: INPE, 148p.
- RIGHETTO, A. M. (1998). **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC-USP. 819 p.
- ROVEY, E. W., WOOLHISER, D. A. e SMITH, R. E. (1977). **A distributed kinematic model of upland watersheds**. Fort Collins, Colorado State University, 52p. Hydrologic Papers 93.
- SALEH, A.; DU, B. (2004). **Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River watershed in central Texas**. Transactions of the ASAE, St.Joseph, v. 47, n. 4, p. 1039-1049.
- SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1967). **The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV. A method of estimating the available water capacities of profiles in the field**. Journal of Soil Science, 18: p. 174-181.
- SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1969). **The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V. Relationships between particle size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available water**. Journal of Soil Science, 20: p, 126-131.
- SANTHI, C; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. (2003). **A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in the Big Cypress Creek watershed**. In: TOTAL Maximum Daily Load (TMDL) environmental regulations II: proceedings of the 8-12 November 2003 conference, Albuquerque, New Mexico. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. p. 384-394.
- SANTOS, P.G. (2010). **Capacidade de uso do solo em microbacia hidrográfica determinada com auxílio de geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina, Mestrado em Ciência do Solo. Lages, Santa Catarina.
- SANTOS, C.A.G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; SRINIVASAN. V.S. (2000) **Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano**. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.1.
- SANTOS, C.A.G.; SILVA, R. M.; PAIVA, F.M.L. (2005). **Modelagem hidrossedimentológica de uma micro-bacia da bacia experimental de São**

- João do Cariri.** In: XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa, p. 401.
- SCHULTZ, G. B.; SOUZA, R. M.; SANTOS, I. (2011). **Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: Aplicação na Bacia do Altíssimo Rio Negro.** In: Lima, J. E. F. W. e Lopes, W. T. A. (orgs.). Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. ABRH, Brasília, DF. Volume 1, 365-382 p.
- SEMMELMAN (2009). **Elementos de Engenharia de Sedimentos.** In: TUCCI, C. E. M. (org) Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 915 - 939 p.
- SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R.(1798). **EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator, 1, Model documentation.** Washington: U,S, Departament of Agriculture, Agricultural Research Service, 1990. 145p.
- SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; CURI, N.; OLIVEIRA, P. M. (2008). **Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de Latossolos no sul de Minas Gerais.** In: Revista Brasileira de Ciência e Solo. Vol. 32, nº 5.
- SILVA, J.R. L; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, T.E.M. (2011). **Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista.** In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 16, n.1, p. 27-36.
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; SRINIVASAN, V.S. (2011). **Perdas de água e sedimento em diferentes sistemas de manejo no semi-árido da Paraíba.** In: Revista Mercator, v.10,nº 21,p 161-170.
- SILVEIRA, A.L.L. (2009). **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.** In: TUCCI, C. E. M. (org) Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 35 - 40 p.
- SOUZA, G. (2007). **MODFIPE – Um modelo distribuído de base física para simulação do escoamento e erosão do solo.** Dissertação de Mestrado, PPGECA/CCT/UFCG, Campina Grande.
- SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G. (1994) **Integration of a basin-scale water quality model with GIS.** Water Resources Bulletin, v.30,n.3, p.453-462.
- SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO C. O. (2003). **Bacia Experimental de Sumé: Descrição e dados coletados.** UFCG/CNPq, 1ª Edição, 129 p.

- SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. (2003). **Erosão Hídrica do Solo no Semi-Árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé.** In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, nº 2, 56-72p.
- SUDENE - O Semiárido Nordeste. Disponível em:  
<http://www.sudene.gov.br/site/extra.php?idioma=&cod=130>. Acessado em: 25 de novembro de 2011.
- TEIXEIRA, A. L. de A.; MORETI, E.; ECHRSTOFOLETTI, A. (1992) **Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica.** Rio Claro: Ed. Do autor, p. 80.
- TIWARI, A.K.; RISSE, L.M.; NEARING, M.A. (2000) **Evaluation of WEPP and Its Comparison with USLE and RUSLE.** Transactions of the ASAE, v.43, n.5. p. 1129-1135.
- TSOU, M. S.; WHITTEMOREZ, D. O. (2001). **User Interface for Ground-water Modeling: ArcView Extension.** Journal of Hydrologic Engineering. V.6, n.3, p. 251-257.
- TUCCI, C. E. M. (2005) **Modelos Hidrológicos.** Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 675 p.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE: Soil Conservation Service (1972). **Hydrology.** National engineering handbooks. Washington: USDA.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE: Soil Conservation Service (1986). **Hydrology.** National engineering handbooks. Washington: USDA.
- UZEIKA, T. (2009). **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.
- VALERIANO, M. (2004). **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul.** In: Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- VAN LIEW, M.W.; GARBRECHT, J. (2003). **Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT.** Journal of the American Water Resources Association, Herndon, v. 39, n. 4, p. 977-986.
- VANONI, V. A. (1977). **Sedimentation engineering.** Edition by ASCE. New York.

- WARD, A. D.; ELLIOT, W. J.(1995) **Environmental Hidrology**. New York: Lewis Publishers.
- WILLIAMS, J, R, (1995). **The EPIC model**. V.P. Singh (ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. 909-1000 pp.
- WILLIAMS, J. R. (1969). **Flood Routing With Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients**. Transactions os the ASAE. Vol. 12, 100-103.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978) **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Washington D.C., USDA, Agriculture Research Service. 58p. (Agriculture Handbook, 735).
- WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. e GOODRICH, D. C. (1990). **KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- XAVIER, F. V. (2009). **Contribuições metodológicas para o estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso utilizando o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Mato Grosso, 166p.
- ZAPPA, M. (2002). **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Tese (Doutorado), Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 167p.
- ZHANG, H. G.; FU, S. H.; FANG, W. H.; IMURA, H.; ZHANG, X. C. (2007). **Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China**. Transactions of the ASABE, v.50, p.911-918.

## ANEXO

Tabela A.1 – Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a BRS no período de 1976 a 1979

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Jan/1976	1,3	0,0	0,0	0,0
Fev/1976	147,5	6,3	7,6	0,1
Mar/1976	208,4	1,0	1,7	0,0
Abr/1976	43,3	2,0	2,8	0,0
Mai/1976	51,3	0,0	0,0	0,0
Jun/1976	1,2	0,0	0,0	0,0
Jul/1976	8,4	0,0	0,0	0,0
Ago/1976	0,8	0,0	0,0	0,0
Set/1976	1,2	0,0	0,0	0,0
Out/1976	71,9	0,2	0,0	0,0
Nov/1976	19,3	0,0	0,0	0,0
Dez/1976	18,8	0,0	0,0	0,0
Jan/1977	91,9	1,5	0,7	0,0
Fev/1977	8,6	0,0	0,0	0,0
Mar/1977	86,6	0,3	0,1	0,0
Abr/1977	288,9	29,8	26,3	0,2
Mai/1977	113,6	35,6	35,8	0,3
Jun/1977	61,7	0,7	0,0	0,0
Jul/1977	68,2	0,5	0,0	0,0
Ago/1977	1,9	0,1	0,0	0,0
Set/1977	2,6	0,1	0,0	0,0
Out/1977	4,2	0,1	0,0	0,0
Nov/1977	1,1	0,1	0,0	0,0
Dez/1977	69,2	0,1	0,8	0,0
Jan/1978	0,0	0,0	0,0	0,0
Fev/1978	90,2	8,8	9,7	0,1
Mar/1978	268,4	23,0	23,0	0,5
Abr/1978	121,6	2,2	1,2	0,0
Mai/1978	77,4	0,1	0,2	0,0
Jun/1978	64,4	0,3	0,0	0,0
Jul/1978	65,9	0,2	0,0	0,0
Ago/1978	5,4	0,1	0,0	0,0
Set/1978	10,3	0,0	0,0	0,0
Out/1978	0,1	0,0	0,0	0,0
Nov/1978	7,1	0,0	0,0	0,0
Dez/1978	3,5	0,0	0,0	0,0
Jan/1979	73,3	0,2	0,4	0,0
Fev/1979	85,2	0,1	0,2	0,0
Mar/1979	115,2	1,5	3,6	0,2

\*Continuação da Tabela A.1

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Abr/1979	63,8	0,5	0,1	0,0
Mai/1979	76,3	0,2	1,5	0,0
Jun/1979	19,2	0,1	0,0	0,0
Jul/1979	21,5	0,0	0,0	0,0
Ago/1979	0,2	0,0	0,0	0,0
Set/1979	7,2	0,0	0,0	0,0
Out/1979	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov/1979	17,9	0,0	0,0	0,0
Dez/1979	0,8	0,0	0,0	0,0

Tabela A.2- Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a sub-bacia de Umburana no período de 1976 a 1979

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Jan/1976	1,8	0,0	0,0	0,00
Fev/1976	136,2	0,0	1,3	0,02
Mar/1976	260,7	9,7	12,0	0,01
Abr/1976	42,4	0,8	1,2	0,05
Mai/1976	65,2	0,0	0,0	0,00
Jun/1976	0,4	0,0	0,0	0,00
Jul/1976	12,3	0,0	0,0	0,00
Ago/1976	0,8	0,0	0,0	0,00
Set/1976	0,0	0,0	0,0	0,00
Out/1976	56,1	0,0	0,0	0,00
Nov/1976	22,8	0,0	0,0	0,00
Dez/1976	23,7	0,0	0,0	0,00
Jan/1977	99,9	3,6	1,9	0,02
Fev/1977	3,7	0,0	0,0	0,00
Mar/1977	80,5	0,0	0,0	0,00
Abr/1977	202,5	0,4	8,3	0,06
Mai/1977	158,8	95,4	80,9	0,44
Jun/1977	55,0	0,2	0,0	0,00
Jul/1977	71,0	0,0	0,0	0,00
Ago/1977	1,1	0,0	0,0	0,00
Set/1977	11,5	0,0	0,0	0,00
Out/1977	6,5	0,0	0,0	0,00
Nov/1977	4,9	0,0	0,0	0,00
Dez/1977	107,9	0,0	2,2	0,01
Jan/1978	0,0	0,0	0,0	0,00
Fev/1978	234,7	0,0	10,2	0,22
Mar/1978	299,3	42,3	32,9	0,16
Abr/1978	119,9	10,4	8,1	0,00
Mai/1978	100,4	4,7	3,9	0,00

\*Continuação da Tabela A.2

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Jun/1978	49,9	0,0	0,0	0,00
Jul/1978	27,8	0,0	0,0	0,00
Ago/1978	2,5	0,0	0,0	0,00
Set/1978	7,6	0,0	0,0	0,00
Out/1978	0,8	0,0	0,0	0,00
Nov/1978	6,2	0,0	0,0	0,00
Dez/1978	1,7	0,0	0,0	0,00
Jan/1979	58,2	0,0	0,0	0,00
Fev/1979	55,9	0,0	0,0	0,00
Mar/1979	84,4	0,0	0,1	0,00
Abr/1979	80,1	2,9	0,8	0,00
Mai/1979	72,0	0,0	0,1	0,00
Jun/1979	20,5	0,0	0,0	0,00
Jul/1979	19,5	0,0	0,0	0,00
Ago/1979	0,0	0,0	0,0	0,00
Set/1979	0,0	0,0	0,0	0,00
Out/1979	0,0	0,0	0,0	0,00
Nov/1979	10,8	0,0	0,0	0,00
Dez/1979	0,8	0,0	0,0	0,00

Tabela A.3 - Precipitação, lâmina observada e calculada e produção de sedimentos para a sub-bacia de Jatobá no período de 1976 a 1979

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Jan/1976	3,6	0,0	0,0	0,00
Fev/1976	172,6	5,0	7,2	0,20
Mar/1976	155,8	2,8	1,2	0,10
Abr/1976	53,8	2,9	1,2	0,10
Mai/1976	47,8	0,3	0,0	0,00
Jun/1976	2,0	0,0	0,0	0,00
Jul/1976	7,2	0,0	0,0	0,00
Ago/1976	0,4	0,0	0,0	0,00
Set/1976	6,1	0,0	0,0	0,00
Out/1976	88,6	0,2	0,0	0,00
Nov/1976	22,6	0,0	0,0	0,00
Dez/1976	25,8	0,0	0,0	0,00
Jan/1977	61,5	0,0	0,0	0,00
Fev/1977	11,3	0,0	0,0	0,00
Mar/1977	93,6	0,0	0,0	0,00
Abr/1977	225,2	12,4	15,9	0,30
Mai/1977	91,8	9,5	8,6	0,20
Jun/1977	74,0	0,2	0,0	0,00

\*Continuação da Tabela A.3

Mês/Ano	Precipitação (mm)	Lâmina Observada (mm)	Lâmina Calculada (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Jul/1977	73,4	0,1	0,0	0,00
Ago/1977	3,2	0,0	0,0	0,00
Set/1977	0,1	0,0	0,0	0,00
Out/1977	1,3	0,0	0,0	0,00
Nov/1977	0,0	0,0	0,0	0,00
Dez/1977	60,4	0,0	0,0	0,00
Jan/1978	0,0	0,0	0,0	0,00
Fev/1978	104,8	0,2	0,0	0,00
Mar/1978	289,7	54,6	42,2	1,70
Abr/1978	127,7	10,3	8,7	0,04
Mai/1978	69,3	4,8	3,1	0,00
Jun/1978	67,7	0,5	0,0	0,00
Jul/1978	79,5	1,4	0,0	0,00
Ago/1978	1,1	0,1	0,0	0,00
Set/1978	9,0	0,0	0,0	0,00
Out/1978	0,0	0,0	0,0	0,00
Nov/1978	4,7	0,0	0,0	0,00
Dez/1978	0,1	0,0	0,0	0,00
Jan/1979	76,2	0,0	0,1	0,00
Fev/1979	147,2	1,0	1,9	0,11
Mar/1979	152,9	9,6	11,8	0,39
Abr/1979	25,3	0,3	0,2	0,00
Mai/1979	121,5	2,1	2,9	0,09
Jun/1979	24,4	0,3	0,0	0,00
Jul/1979	24,3	0,0	0,0	0,00
Ago/1979	0,6	0,0	0,0	0,00
Set/1979	32,9	0,0	0,0	0,00
Out/1979	0,0	0,0	0,0	0,00
Nov/1979	19,8	0,0	0,0	0,00
Dez/1979	0,0	0,0	0,0	0,00

Tabela A.4 – Escoamento superficial e porte de sedimentos nos Cenários 1 e 5 por sub-bacia no mês de fevereiro de 1988.

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)
1	8,35	0,439	8,53	0,009
2	7,38	0,422	7,45	0,011
3	8,37	0,412	8,66	0,005
4	8,37	0,312	8,55	0,007
5	7,77	0,157	8,55	0,008
6	8,39	0,293	8,56	0,008
7	5,92	0,816	6,26	0,013
8	8,43	0,166	8,57	0,007
9	8,45	0,214	8,58	0,007
10	8,52	0,069	8,61	0,006
11	8,42	0,236	7,16	0,005
12	8,33	0,382	8,57	0,007
13	8,37	0,337	8,54	0,009
14	8,08	0,171	8,70	0,003
15	8,43	0,249	8,69	0,005
16	8,36	0,262	8,51	0,007
17	8,49	0,139	6,58	0,004
18	8,38	0,307	8,57	0,008
19	8,43	0,196	8,67	0,006
20	8,49	0,209	8,63	0,006
21	7,19	0,604	7,23	0,011
22	8,44	0,201	8,59	0,007
23	8,40	0,225	8,52	0,008
24	8,37	0,303	8,56	0,007
25	7,97	0,085	8,01	0,008
26	6,89	0,380	6,93	0,012
27	7,51	0,007	7,36	0,007
28	8,18	0,225	8,28	0,009
29	7,10	1,592	7,34	0,012
30	6,56	1,043	5,17	0,005
31	7,79	0,011	6,89	0,008
32	8,32	0,402	8,55	0,008
33	8,35	0,439	8,53	0,009
34	7,38	0,422	7,45	0,011
35	8,37	0,412	8,66	0,005
36	8,37	0,312	8,55	0,007
37	7,77	0,157	8,55	0,008
38	8,39	0,293	8,56	0,008
39	5,92	0,816	6,26	0,013
40	8,43	0,166	8,57	0,007

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)
41	8,45	0,214	8,58	0,007
42	8,52	0,069	8,61	0,006
43	8,42	0,236	7,16	0,005
44	8,33	0,382	8,57	0,007
45	8,37	0,337	8,54	0,009
46	8,08	0,171	8,70	0,003
47	8,43	0,249	8,69	0,005
48	8,36	0,262	8,51	0,007
49	8,49	0,139	6,58	0,004
50	8,38	0,307	8,57	0,008
51	8,43	0,196	8,67	0,006
52	8,49	0,209	8,63	0,006
53	7,19	0,604	7,23	0,011
54	8,44	0,201	8,59	0,007
55	8,40	0,225	8,52	0,008
56	8,37	0,303	8,56	0,007
57	7,97	0,085	8,01	0,008
58	6,89	0,380	6,93	0,012
59	7,51	0,007	7,36	0,007
60	8,18	0,225	8,28	0,009
61	7,10	1,592	7,34	0,012
62	6,56	1,043	5,17	0,005
63	7,79	0,011	6,89	0,008
64	8,32	0,402	8,55	0,008
65	8,35	0,439	8,53	0,009
66	7,38	0,422	7,45	0,011
67	8,37	0,412	8,66	0,005
68	8,37	0,312	8,55	0,007
69	7,77	0,157	8,55	0,008
70	8,39	0,293	8,56	0,008
71	5,92	0,816	6,26	0,013
72	8,43	0,166	8,57	0,007
73	8,45	0,214	8,58	0,007
74	8,52	0,069	8,61	0,006
75	8,42	0,236	7,16	0,005
76	8,33	0,382	8,57	0,007
77	8,37	0,337	8,54	0,009
78	8,08	0,171	8,70	0,003
79	8,43	0,249	8,69	0,005
80	8,36	0,262	8,51	0,007
81	8,49	0,139	6,58	0,004
82	8,38	0,307	8,57	0,008
83	8,43	0,196	8,67	0,006

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos ( t/ha)
84	8,49	0,209	8,63	0,006
85	7,19	0,604	7,23	0,011
86	8,44	0,201	8,59	0,007
87	8,40	0,225	8,52	0,008
88	8,37	0,303	8,56	0,007
89	7,97	0,085	8,01	0,008
90	6,89	0,380	6,93	0,012
91	7,51	0,007	7,36	0,007
92	8,18	0,225	8,28	0,009
93	7,10	1,592	7,34	0,012
94	6,56	1,043	5,17	0,005
95	7,79	0,011	6,89	0,008
96	8,32	0,402	8,55	0,008
97	8,35	0,439	8,53	0,009
98	7,38	0,422	7,45	0,011
99	8,37	0,412	8,66	0,005
100	8,37	0,312	8,55	0,007
101	7,77	0,157	8,55	0,008
102	8,39	0,293	8,56	0,008
103	5,92	0,816	6,26	0,013
104	8,43	0,166	8,57	0,007
105	8,45	0,214	8,58	0,007
106	8,52	0,069	8,61	0,006
107	8,42	0,236	7,16	0,005
108	8,33	0,382	8,57	0,007
109	8,37	0,337	8,54	0,009
110	8,08	0,171	8,70	0,003
111	8,43	0,249	8,69	0,005
112	8,36	0,262	8,51	0,007
113	8,49	0,139	6,58	0,004
114	8,38	0,307	8,57	0,008
115	8,43	0,196	8,67	0,006
116	8,49	0,209	8,63	0,006
117	7,19	0,604	7,23	0,011
118	8,44	0,201	8,59	0,007
119	8,40	0,225	8,52	0,008
120	8,37	0,303	8,56	0,007
121	7,97	0,085	8,01	0,008
122	6,89	0,380	6,93	0,012
123	7,51	0,007	7,36	0,007
124	8,18	0,225	8,28	0,009
125	7,10	1,592	7,34	0,012
126	6,56	1,043	5,17	0,005

\*Continuação da Tabela A.4

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos ( t/ha)
127	7,79	0,011	6,89	0,008
128	8,32	0,402	8,55	0,008
129	8,35	0,439	8,53	0,009
130	7,38	0,422	7,45	0,011
131	8,37	0,412	8,66	0,005
132	8,37	0,312	8,55	0,007
133	7,77	0,157	8,55	0,008
134	8,39	0,293	8,56	0,008
135	5,92	0,816	6,26	0,013
136	8,43	0,166	8,57	0,007
137	8,45	0,214	8,58	0,007
138	8,52	0,069	8,61	0,006
139	8,42	0,236	7,16	0,005
140	8,33	0,382	8,57	0,007
141	8,37	0,337	8,54	0,009
142	8,08	0,171	8,70	0,003
143	8,43	0,249	8,69	0,005
144	8,36	0,262	8,51	0,007
145	8,49	0,139	6,58	0,004
146	8,38	0,307	8,57	0,008
147	8,43	0,196	8,67	0,006
148	8,49	0,209	8,63	0,006
149	7,19	0,604	7,23	0,011
150	8,44	0,201	8,59	0,007
151	8,40	0,225	8,52	0,008
152	8,37	0,303	8,56	0,007
153	7,97	0,085	8,01	0,008
154	6,89	0,380	6,93	0,012
155	7,51	0,007	7,36	0,007
156	8,18	0,225	8,28	0,009
157	7,10	1,592	7,34	0,012
158	6,56	1,043	5,17	0,005
159	7,79	0,011	6,89	0,008
160	8,32	0,402	8,55	0,008
161	8,35	0,439	8,53	0,009
162	7,38	0,422	7,45	0,011
163	8,37	0,412	8,66	0,005
164	8,37	0,312	8,55	0,007
165	7,77	0,157	8,55	0,008
166	8,39	0,293	8,56	0,008
167	5,92	0,816	6,26	0,013
168	8,43	0,166	8,57	0,007
169	8,45	0,214	8,58	0,007

\*Continuação da Tabela A.4

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos ( t/ha)
170	8,52	0,069	8,61	0,006
171	8,42	0,236	7,16	0,005
172	8,33	0,382	8,57	0,007
173	8,37	0,337	8,54	0,009
174	8,08	0,171	8,70	0,003
175	8,43	0,249	8,69	0,005
176	8,36	0,262	8,51	0,007
177	8,49	0,139	6,58	0,004
178	8,38	0,307	8,57	0,008
179	8,43	0,196	8,67	0,006
180	8,49	0,209	8,63	0,006
181	7,19	0,604	7,23	0,011
182	8,44	0,201	8,59	0,007
183	8,40	0,225	8,52	0,008
184	8,37	0,303	8,56	0,007
185	7,97	0,085	8,01	0,008
<b>186</b>	<b>6,89</b>	<b>0,380</b>	<b>6,93</b>	<b>0,012</b>
187	7,51	0,007	7,36	0,007
188	8,18	0,225	8,28	0,009
189	7,10	1,592	7,34	0,012
190	6,56	1,043	5,17	0,005
191	7,79	0,011	6,89	0,008
<b>192</b>	<b>8,32</b>	<b>0,402</b>	<b>8,55</b>	<b>0,008</b>
193	8,35	0,439	8,53	0,009
194	7,38	0,422	7,45	0,011
195	8,37	0,412	8,66	0,005
196	8,37	0,312	8,55	0,007
<b>197</b>	<b>7,77</b>	<b>0,157</b>	<b>8,55</b>	<b>0,008</b>
<b>198</b>	<b>8,39</b>	<b>0,293</b>	<b>8,56</b>	<b>0,008</b>
<b>199</b>	<b>5,92</b>	<b>0,816</b>	<b>6,26</b>	<b>0,013</b>
200	8,43	0,166	8,57	0,007
201	8,45	0,214	8,58	0,007
202	8,52	0,069	8,61	0,006
<b>203</b>	<b>8,42</b>	<b>0,236</b>	<b>7,16</b>	<b>0,005</b>
<b>204</b>	<b>8,33</b>	<b>0,382</b>	<b>8,57</b>	<b>0,007</b>
205	8,37	0,337	8,54	0,009
206	8,08	0,171	8,70	0,003
207	8,43	0,249	8,69	0,005
<b>208</b>	<b>8,36</b>	<b>0,262</b>	<b>8,51</b>	<b>0,007</b>
<b>209</b>	<b>8,49</b>	<b>0,139</b>	<b>6,58</b>	<b>0,004</b>
<b>210</b>	<b>8,38</b>	<b>0,307</b>	<b>8,57</b>	<b>0,008</b>
<b>211</b>	<b>8,43</b>	<b>0,196</b>	<b>8,67</b>	<b>0,006</b>
<b>212</b>	<b>8,49</b>	<b>0,209</b>	<b>8,63</b>	<b>0,006</b>

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos ( t/ha)
213	7,19	0,604	7,23	0,011
214	8,44	0,201	8,59	0,007
<b>215</b>	<b>8,40</b>	<b>0,225</b>	<b>8,52</b>	<b>0,008</b>
<b>216</b>	<b>8,37</b>	<b>0,303</b>	<b>8,56</b>	<b>0,007</b>
<b>217</b>	<b>7,97</b>	<b>0,085</b>	<b>8,01</b>	<b>0,008</b>
<b>218</b>	<b>6,89</b>	<b>0,380</b>	<b>6,93</b>	<b>0,012</b>
219	7,51	0,007	7,36	0,007
220	8,18	0,225	8,28	0,009
221	7,10	1,592	7,34	0,012
222	6,56	1,043	5,17	0,005
223	7,79	0,011	6,89	0,008
<b>224</b>	<b>8,32</b>	<b>0,402</b>	<b>8,55</b>	<b>0,008</b>
225	8,35	0,439	8,53	0,009
<b>226</b>	<b>7,38</b>	<b>0,422</b>	<b>7,45</b>	<b>0,011</b>
<b>227</b>	<b>8,37</b>	<b>0,412</b>	<b>8,66</b>	<b>0,005</b>
228	8,37	0,312	8,55	0,007
229	7,77	0,157	8,55	0,008
230	8,39	0,293	8,56	0,008
231	5,92	0,816	6,26	0,013
232	8,43	0,166	8,57	0,007
233	8,45	0,214	8,58	0,007
234	8,52	0,069	8,61	0,006
235	8,42	0,236	7,16	0,005
236	8,33	0,382	8,57	0,007
237	8,37	0,337	8,54	0,009
<b>238</b>	<b>8,08</b>	<b>0,171</b>	<b>8,70</b>	<b>0,003</b>
<b>239</b>	<b>8,43</b>	<b>0,249</b>	<b>8,69</b>	<b>0,005</b>
240	8,36	0,262	8,51	0,007
241	8,49	0,139	6,58	0,004
242	8,38	0,307	8,57	0,008
243	8,43	0,196	8,67	0,006
244	8,49	0,209	8,63	0,006
<b>245</b>	<b>7,19</b>	<b>0,604</b>	<b>7,23</b>	<b>0,011</b>
<b>246</b>	<b>8,44</b>	<b>0,201</b>	<b>8,59</b>	<b>0,007</b>
247	8,40	0,225	8,52	0,008
248	8,37	0,303	8,56	0,007
249	7,97	0,085	8,01	0,008
<b>250</b>	<b>6,89</b>	<b>0,380</b>	<b>6,93</b>	<b>0,012</b>
251	7,51	0,007	7,36	0,007
<b>252</b>	<b>8,18</b>	<b>0,225</b>	<b>8,28</b>	<b>0,009</b>
253	7,10	1,592	7,34	0,012
254	6,56	1,043	5,17	0,005
255	7,79	0,011	6,89	0,008

Sub-Bacia	Cenário 1		Cenário 5	
	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos (t/ha)	Escoamento Superficial (mm)	Aporte de sedimentos ( t/ha)
256	8,32	0,402	8,55	0,008
<b>257</b>	<b>8,35</b>	<b>0,439</b>	<b>8,53</b>	<b>0,009</b>
258	7,38	0,422	7,45	0,011
259	8,37	0,412	8,66	0,005
260	8,37	0,312	8,55	0,007
<b>261</b>	<b>7,77</b>	<b>0,157</b>	<b>8,55</b>	<b>0,008</b>
<b>262</b>	<b>8,39</b>	<b>0,293</b>	<b>8,56</b>	<b>0,008</b>
263	5,92	0,816	6,26	0,013
264	8,43	0,166	8,57	0,007
265	8,45	0,214	8,58	0,007
<b>266</b>	<b>8,52</b>	<b>0,069</b>	<b>8,61</b>	<b>0,006</b>
267	8,42	0,236	7,16	0,005
268	8,33	0,382	8,57	0,007
269	8,37	0,337	8,54	0,009
270	8,08	0,171	8,70	0,003
271	8,43	0,249	8,69	0,005
<b>272</b>	<b>8,36</b>	<b>0,262</b>	<b>8,51</b>	<b>0,007</b>
<b>273</b>	<b>8,49</b>	<b>0,139</b>	<b>6,58</b>	<b>0,004</b>
274	8,38	0,307	8,57	0,008
275	8,43	0,196	8,67	0,006
276	8,49	0,209	8,63	0,006
277	7,19	0,604	7,23	0,011
<b>278</b>	<b>8,44</b>	<b>0,201</b>	<b>8,59</b>	<b>0,007</b>
279	8,40	0,225	8,52	0,008
280	8,37	0,303	8,56	0,007
281	7,97	0,085	8,01	0,008
282	6,89	0,380	6,93	0,012
283	7,51	0,007	7,36	0,007
<b>284</b>	<b>8,18</b>	<b>0,225</b>	<b>8,28</b>	<b>0,009</b>

\* As sub-bacias em negrito são as que compõem a porção reflorestada da BRS (sudoeste da bacia).

Tabela A. 5 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 1.

Mês/Ano	1986			1988		
	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Janeiro	20,8	0	0	32,80	0,00	0,00
Fevereiro	185,2	11,54	0,31	181,00	7,61	0,16
Março	365,1	31,79	0,35	183,00	2,49	0,02
Abril	169,8	3,38	0,03	150,50	1,42	0,01
Mai	77,3	1,19	0,01	36,40	0,00	0,00
Junho	26	0	0	43,10	0,00	0,00
Julho	51,5	0	0	89,70	0,76	0,01
Agosto	18	0	0	0,00	0,00	0,00
Setembro	20,8	0	0	4,00	0,00	0,00
Outubro	0	0	0	0,40	0,00	0,00
Novembro	25,4	0	0	2,50	0,00	0,00
Dezembro	3,6	0	0	7,80	0,00	0,00

Tabela A.6 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 2.

Mês/Ano	1986			1988		
	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Janeiro	20,80	0,00	0,00	32,80	0,00	0,00
Fevereiro	185,20	15,71	0,01	181,00	11,70	0,00
Março	365,10	36,92	0,01	183,00	5,49	0,00
Abril	169,80	5,40	0,00	150,50	7,26	0,00
Mai	77,30	1,60	0,00	36,40	0,00	0,00
Junho	26,00	0,00	0,00	43,10	0,00	0,00
Julho	51,50	0,00	0,00	89,70	1,12	0,00
Agosto	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Setembro	20,80	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00
Outubro	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
Novembro	25,40	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
Dezembro	3,60	0,00	0,00	7,80	0,00	0,00

Tabela A.7 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 3,

Mês/Ano	1986			1988		
	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Janeiro	20,80	0,00	0,00	32,80	0,00	0,00
Fevereiro	185,20	13,00	0,37	181,00	9,70	0,31
Março	365,10	52,81	1,16	183,00	3,52	0,10
Abril	169,80	12,36	0,51	150,50	4,23	0,07
Maió	77,30	9,21	0,45	36,40	0,00	0,00
Junho	26,00	0,00	0,00	43,10	0,00	0,00
Julho	51,50	0,00	0,00	89,70	1,08	0,02
Agosto	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Setembro	20,80	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00
Outubro	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
Novembro	25,40	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
Dezembro	3,60	0,00	0,00	7,80	0,00	0,00

Tabela A.8 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 4.

Mês/Ano	1986			1988		
	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Janeiro	20,80	0,00	0,00	32,80	0,00	0,00
Fevereiro	185,20	13,00	0,37	181,00	9,44	0,18
Março	365,10	31,12	0,66	183,00	3,58	0,10
Abril	169,80	7,51	0,24	150,50	8,51	0,14
Maió	77,30	6,65	0,30	36,40	0,01	0,00
Junho	26,00	0,00	0,00	43,10	0,00	0,00
Julho	51,50	0,00	0,00	89,70	1,22	0,02
Agosto	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Setembro	20,80	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00
Outubro	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
Novembro	25,40	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
Dezembro	3,60	0,00	0,00	7,80	0,00	0,00

Tabela A.9 - Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos mensal no ano de 1988 para o Cenário 5.

Mês/Ano	1986			1988		
	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)	Precipitação (mm)	Escoamento superficial (mm)	Produção de sedimentos (t/ha)
Janeiro	20,80	0,00	0,00	32,80	0,00	0,00
Fevereiro	185,20	11,65	0,20	181,00	8,10	0,11
Março	365,10	31,74	0,24	183,00	2,88	0,02
Abril	169,80	3,48	0,03	150,50	1,75	0,01
Maiο	77,30	1,23	0,01	36,40	0,00	0,00
Junho	26,00	0,00	0,00	43,10	0,00	0,00
Julho	51,50	0,00	0,00	89,70	0,75	0,00
Agosto	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Setembro	20,80	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00
Outubro	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
Novembro	25,40	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00
Dezembro	3,60	0,00	0,00	7,80	0,00	0,00