

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ALTA BACIA DO CÓRREGO
CACHOEIRINHA (RIO CLARO, SP) ATRAVÉS DO SOFTWARE “SOIL AND WATER
ASSESSMENT TOOL” (SWAT)

Renata Jovanini Gonçalves

Rio Claro (SP)

2014

RENATA JOVANINI GONÇALVES

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA ALTA BACIA DO CÓRREGO CACHOEIRINHA
(RIO CLARO, SP) ATRAVÉS DO SOFTWARE “SOIL
AND WATER ASSESSMENT TOOL” (SWAT)**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro (SP)

2014

551.303 Gonçalves, Renata Jovanini
G635m Modelagem do transporte de sedimentos na Alta Bacia do Córrego
Cachoeirinha (Rio Claro, SP) através do software "Soil and Water
Assessment Tool" (SWAT) / Renata Jovanini Gonçalves. - Rio Claro,
2014
57 f. : il., figs., tabs., quadros

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Sedimentação e depósitos. 2. Simulação. 3. Processos
hidrossedimentológicos. 4. MEUPS. 5. Banco de dados. I. Título.

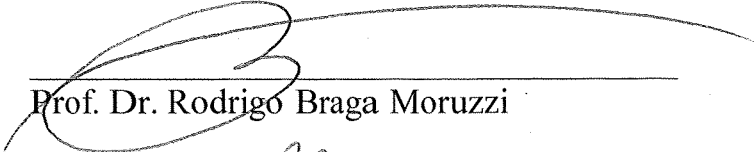
Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

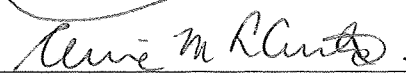
RENATA JOVANINI GONÇALVES

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ALTA
BACIA DO CÓRREGO CACHOEIRINHA (RIO CLARO, SP)
ATRAVÉS DO SOFTWARE "SOIL AND WATER ASSESSMENT
TOOL" (SWAT)

*Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas, Campus de
Rio Claro (SP), da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Engenheiro Ambiental.*

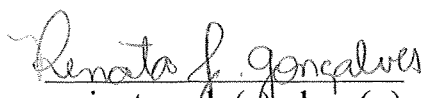
Comissão Examinadora

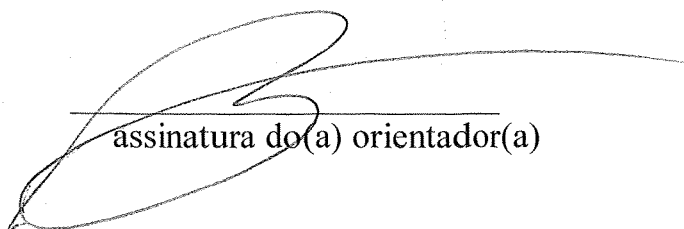

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi


Prof. Dra. Cenira Maria Lupinacci da Cunha


Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Rio Claro, 27 de junho de 2014


assinatura do(a) aluno(a)


assinatura do(a) orientador(a)

*Aos meus pais, minha irmã e minha filha
Beatriz, pois estes me deram motivos para
seguir em frente e me trouxeram paz nos
momentos de dificuldade.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela oportunidade de realização do curso e pelo ambiente proporcionado.

Ao CEAPLA por ter disponibilizado todos os dados necessários para o estudo.

Ao Professor Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, pela confiança e orientações.

Aos meus pais, por toda a dedicação nos últimos anos, por toda a atenção dada enquanto eu estava longe, por toda a confiança, por todo o amor e carinho que sei que têm por mim.

À minha irmã, a qual me auxiliou em diversas etapas da minha jornada, me apoiou e se preocupou.

À minha filha Beatriz, cujo nascimento durante a graduação me fez seguir em frente com muita força de vontade e me ajudou, proporcionando alegria, paz e felicidade.

Às minhas amigas da Universidade, por toda a amizade e momentos alegres proporcionados durante minha formação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que deram alguma contribuição, direta ou indiretamente, para minha formação.

Muito obrigada!

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo simular e avaliar o transporte de sedimentos na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha, localizada no município de Rio Claro, SP, bem como comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriormente realizados na mesma bacia. O estudo foi baseado na modelagem por meio do software “*Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT), ferramenta de grande abrangência que aborda diversos processos físicos. Neste trabalho foram tratados os processos hidrossedimentológicos, com o objetivo de compreender a produção e o transporte de sedimentos. A Bacia do Córrego Cachoeirinha é compreendida por uma área com predominância de uso agrícola, especialmente pelo cultivo de cana-de-açúcar. O banco de dados para inclusão no software foi construído a partir de elementos climáticos, topográficos, pedológicos e de uso e ocupação do solo da área, além da inclusão dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS). A análise foi realizada para um período de 16 anos (1994-2010), sendo este o intervalo de dados disponibilizados pelo CEAPLA. Os resultados obtidos foram analisados em termos de escoamento superficial e produção anual de sedimentos. A média do aporte de sedimentos na simulação foi de 0,94 t/ha/ano, enquanto que o aporte máximo anual foi de 7,28 t/ha/ano.

Palavras-chave: Sedimentos. Córrego Cachoeirinha. Modelagem. SWAT. MEUPS.

ABSTRACT

This study aimed to simulate and evaluate the sediment transport in Upper Basin Stream Cachoeirinha in Rio Claro, SP, and compare the results with previous studies performed in the same basin. The modeling software used in this study was "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT), which is a very comprehensive tool that discusses many physical processes. In this work, the hydrosedimentological processes were treated, aiming to understand the sediment production and transport. The Basin Stream Cachoeirinha has an area with predominantly agricultural use, especially sugar cane. The database for inclusion in software was constructed from the following elements: climatic, topographical, soil type and use and land cover of the area, also including the parameters of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). The analysis was conducted for a period of 16 years (1994-2010), which is the range of data available from CEAPLA. The results were analyzed in terms of annual runoff and sediment yield. The average sediment delivery in the simulation was 0.94 t/ha/year, while the maximum annual contribution was 7.28 t/ha/year.

Keywords: Sediment. Stream Cachoeirinha. Modeling. SWAT. MUSLE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.....	14
Figura 2 - Localização da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha. Rio Claro - SP (Sem escala).....	31
Figura 2 - Fluxograma metodológico das etapas do SWAT.....	34
Figura 4 - Definição do uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha no software SWAT.....	37
Figura 5 - Definição das classes de declividade no modelo SWAT.....	39
Figura 6 - Carta de uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.....	43
Figura 7 - Delineamento da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha a partir do MDE, pelo software SWAT.....	45
Figura 8 - Carta de declividade da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.....	46
Figura 9 - Parâmetros hidrológicos de saída no modelo SWAT.....	48
Figura 10 - Dados de precipitação anual, escoamento superficial e evapotranspiração por tipo de uso. SUGC: cana de açúcar; AVIC: granja; ORAN: citrus; PINE: silvicultura; FRSE: mata nativa.....	48
Figura 11 - Análise de sedimentos feita pelo SWAT.....	49
Figura 12 - Carta de Estimativa de perda do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fragmento da planilha utilizada para o cálculo do PNE da alta bacia do Córrego Cachoeirinha.....	40
Tabela 2 - Valores de CP para as classes de uso e ocupação do solo na Alta bacia do Córrego Cachoeirinha.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta....	23
Quadro 2 - Valores de P da equação de perda de solo para algumas práticas conservacionistas.....	23
Quadro 3 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.....	25
Quadro 4 - Valores do parâmetro CN (curva-número) para bacias rurais.....	27
Quadro 5 - Valores de CN (curva-número) para bacias urbanas e suburbanas.....	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.....	14
3.2	Erosão (produção, transporte e deposição de sedimentos).....	16
3.3	Equações de Perdas de Solo.....	18
3.3.1	EUPS (Equação Universal de Perda de Solo).....	19
3.3.2	MEUPS (Equação Universal de Perda de Solo Modificada) ou MUSLE	23
3.4	Modelagem – SWAT	28
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
5	MATERIAL E MÉTODOS	34
5.1	Construção da base de dados.....	34
5.2	Inserção de dados no modelo SWAT.....	36
5.3	Simulação do modelo (<i>Swat simulation</i>).....	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1	Análise das condições de uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.....	42
6.2	Avaliação dos parâmetros de relevo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha	44
6.3	Resultados hidrológicos	47
6.4	Resultados de produção de sedimentos.....	48
6.5	Comparação dos resultados obtidos com trabalhos anteriormente realizados na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.....	50
7	CONCLUSÕES	53
8	RECOMENDAÇÕES	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Toda bacia hidrográfica possui seus processos erosivos naturais: a produção, o transporte e a deposição de sedimentos, sendo estes benéficos para a formação da paisagem como as colinas, planícies, vales férteis, etc. No entanto, “o mal aparece quando o homem, por ignorância, destrói os anteparos naturais, forçando o processo erosivo e deixando-o agir livremente”. Essa erosão é conhecida como erosão acelerada, ou seja, os processos naturais ocorrem de forma rápida e desordenada, removendo solos que a natureza levou anos para formar. A intensificação da erosão através da intervenção humana se dá por meio do crescimento populacional atrelado à expansão urbana e também pelas práticas agrícolas inadequadas, causando danos aos solos e um possível assoreamento dos rios pertencentes à bacia (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Para evitar ou diminuir a ocorrência desses fenômenos acelerados é necessária uma gestão adequada dos recursos hídricos aliada a práticas corretas de uso e manejo do solo. Portanto, um primeiro passo seria conhecer quais processos físicos estão ocorrendo em determinada bacia e, posteriormente, realizar análises ambientais para prever os efeitos de diferentes alternativas de uso e manejo da mesma. A inferência desses cenários pode ser feita através de modelagem com o auxílio de diversos softwares de domínio público.

A Bacia do presente estudo é denominada Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha, compreendendo uma área segundo Scalzitti & Mendes (1995 apud BEGA, 2010, p. 26) de aproximadamente 18,67 km² e localizada no município de Rio Claro, SP. A bacia do Córrego Cachoeirinha faz parte da bacia do Rio Corumbataí, sendo esta última situada na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, na Depressão Periférica Paulista, centro-leste do Estado de São Paulo, em área de afloramento de rochas paleozóicas (Grupo Itararé, Formação Tatuí e Grupo Passa Dois – formações Irati e Corumbataí) e cenozóicas (Formação Rio Claro).

Segundo Bega (2010) a unidade que aflora predominantemente na região do córrego em estudo é a Formação Rio Claro. Um fato importante é a presença atual de várias lagoas desenvolvidas sobre seus depósitos, além de extensas voçorocas.

Segundo dados retirados do Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí (CEAPLA), há ocorrência de dois tipos pedológicos principais na Formação Rio Claro: Argissolos Vermelho-Amarelo e Latossolos Vermelho-Amarelo. Segundo Koffler et al (1993 apud

SILVA, 2008/2009, p. 8), na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha desenvolvem-se solos somente do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo.

O clima da bacia é do tipo Cwa, sub-tropical (classificação de Koppen), seco no inverno e chuvoso no verão. O clima influencia os processos erosivos através de sua dinâmica pluvial, pois o impacto da gota da chuva é um agente desagregador das partículas do solo.

Com relação ao uso e ocupação do solo da bacia do Córrego Cachoeirinha há predominância do cultivo de citrus e um avanço da cana-de-açúcar, deixando os solos desprotegidos, expostos. Isso ocorre em função da retirada da cultura incipiente (cana ou citrus) associada ao desenvolvimento do novo plantio, fazendo com que as plantas não se protejam contra o impacto das gotas de chuva (BEGA, 2010).

O conjunto dos fatores analisados acima nos permite inferir que o potencial erosivo da bacia em estudo é alto, pois os elementos geológicos, pedológicos, climáticos e de uso e ocupação do solo conferem processos de desgaste nos solos da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.

Tal conclusão sobre a susceptibilidade à erosão da bacia em estudo faz com que sejam realizadas cada vez mais pesquisas a respeito da produção, transporte e deposição dos sedimentos decorrentes desses processos erosivos, de modo que venham a surgir alternativas para o melhor gerenciamento dessa área, diminuindo seu risco a impactos ambientais. A modelagem e simulação são de grande valia neste caso, pois auxiliam na predição do impacto ao qual a bacia está sujeita e, dessa forma, chamam a atenção para a necessidade de melhorias ou de mudanças nos seus usos e ocupações.

O software “*Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT) foi desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Solo e Água (*Soil and Water Research Laboratory*) em Temple, Texas, USA e tem como principal objetivo quantificar o impacto do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas. É de domínio público e ativamente apoiado pelo Serviço de Pesquisa Agrícola do “*United States Department of Agriculture*” (USDA). Assim sendo, a presente pesquisa fará uso deste software para analisar o atual cenário da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha com relação a seu aporte de sedimentos, comparando os resultados com trabalhos já realizados na área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Simular e analisar as condições do transporte de sedimentos na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha, localizada no município de Rio Claro, SP utilizando o software SWAT e comparar os resultados com trabalhos realizados anteriormente.

2.2 Objetivos específicos

Para melhor entendimento do objetivo do trabalho, elencou-se os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar as condições de uso e ocupação da bacia estudada;
- b) analisar as condições climáticas da bacia;
- c) avaliar os parâmetros de relevo considerados;
- d) analisar os resultados obtidos com relação à quantidade de sedimentos produzida e transportada e à dinâmica hídrica da bacia;
- e) comparar os resultados obtidos de aporte de sedimentos com outros trabalhos realizados anteriormente (BEGA, 2010 e SILVA, 2008/2009).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

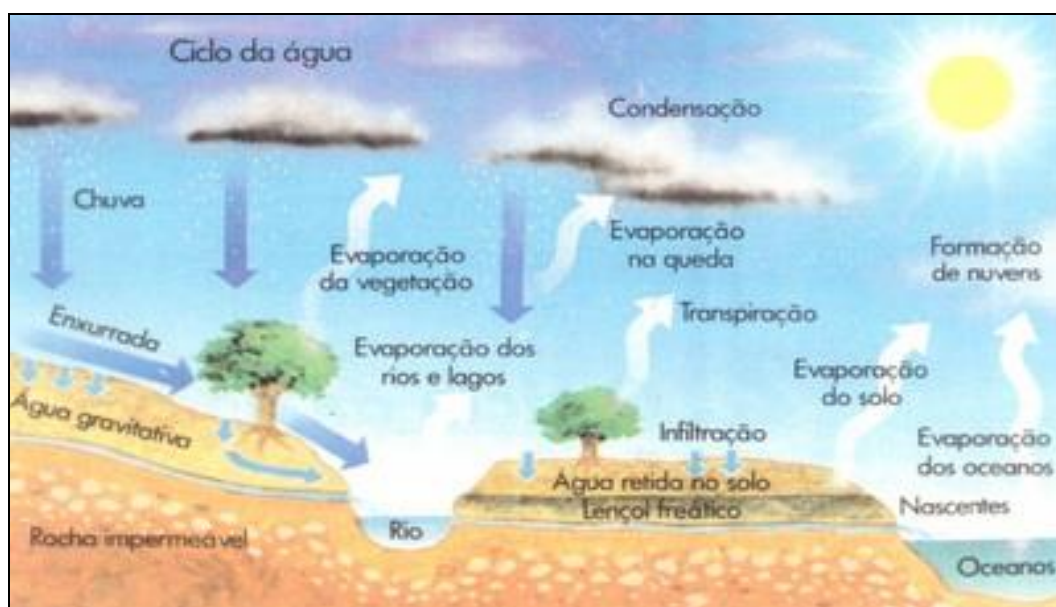
3.1 Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica

Segundo Vilella (1979), o ciclo hidrológico é um fenômeno o qual retrata o comportamento natural da água, sendo conduzido pela força da gravidade e pela energia solar. Seu início se dá com a evaporação das águas dos oceanos, resultando em vapor. Este vapor é impulsionado pelas massas de ar, sendo condensado sob determinadas condições, formando nuvens e resultando em precipitação, a qual se dispersa sob diversas formas, sendo a chuva a mais comum.

Grande parte da água precipitada fica retida no solo, retornando à atmosfera em forma de evaporação e transpiração das plantas. O restante se divide em outros dois caminhos: parte é convertida em infiltração, por conta da porosidade do solo e, quando este solo encontra-se saturado, a água segue seu segundo caminho, transformando-se em escoamento superficial através da gravidade para cotas mais baixas (VILELLA, 1979).

O ciclo hidrológico pode ser compreendido através da visualização da Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico.



Fonte: Info Escola.

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água precipitada, a qual faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Esta área pode ser definida como a porção onde ocorre a fase terrestre do ciclo hidrológico. A bacia hidrográfica

é composta por um conjunto de superfícies vertentes e por uma rede de drenagem formada por cursos de água, os quais convergem a um leito único, denominado exutório (TUCCI, 2009).

Os cursos d'água são os principais componentes das bacias hidrográficas, as quais podem ocupar grandes extensões territoriais e são separadas das bacias vizinhas por um divisor de águas, ou seja, uma linha de separação a qual divide as precipitações que caem em bacias vizinhas, encaminhando o escoamento superficial para outro sistema fluvial (TEIXEIRA et al., 2000, p. 192).

Segundo Tucci (2009), a precipitação que cai sobre os declives infiltra-se totalmente nos solos até haver saturação superficial destes, momento em que começam a decrescer as taxas de infiltração e a aumentar os escoamentos superficiais, caso a precipitação persista. Conclui-se que as vertentes são fontes produtoras de água enquanto que a rede de drenagem transporta essa água até a seção de saída da bacia. Esse processo é análogo ao processo de transporte de sedimentos: os declives “produzem” os sedimentos através do fenômeno de erosão enquanto que a rede de drenagem se encarrega de transportá-los, em conjunto com a água, levando também os sedimentos produzidos nos próprios leitos dos rios. Portanto, rios e vertentes estão em progressiva interação para que a bacia hidrográfica se adapte às solicitações da natureza.

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada (*input*) é o volume de água precipitado e a saída (*output*) é o volume escoado pelo exutório. A diferença entre o volume de entrada e o de saída ($\text{input} - \text{output}$) por unidade de tempo nos dá a variação do armazenamento dentro do sistema em um determinado tempo, ou seja, sua vazão efluente (VILLELA, 1979).

As perdas intermediárias são referentes aos volumes evaporados e transpirados e os infiltrados profundamente. O papel hidrológico de uma bacia é transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma distribuída no tempo (TUCCI, 2009).

Segundo Tucci (2009), em seu movimento rumo à saída de uma bacia hidrográfica, a água flui sobre as rochas e os solos que formam ou revestem as vertentes e as calhas das redes de drenagem. Os obstáculos encontrados são determinantes no caminho que a água seguirá e na sua respectiva velocidade, promovendo a remoção e o transporte de partículas sólidas morro ou rio abaixo. O transporte de sedimentos pode ocasionar numa redistribuição de

porções sólidas por toda a bacia, podendo até modificar o ciclo hidrológico, afetando o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos.

Conclui-se que existe uma considerável interação entre os ciclos hidrológico e sedimentológico, formando o ciclo hidrossedimentológico, o qual envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia (TUCCI, 2009).

Os principais processos do ciclo hidrossedimentológico são: desagregação, separação ou erosão, transporte e deposição os quais serão abordados a seguir.

3.2 Erosão (produção, transporte e deposição de sedimentos)

Erosão é um processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento. A erosão do solo é a principal causa de esgotamento acelerado das terras, podendo ser comumente hídrica ou eólica. As enxurradas, oriundas das águas de chuva que não ficaram retidas sobre a superfície ou não se infiltraram, são responsáveis por transportar partículas de solo em suspensão e nutrientes dissolvidos. Por vezes esse processo pode ocorrer pela ação do vento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010, p. 68).

Quantifica-se que a erosão hídrica afeta cerca de 1,1 milhões de hectares (Mha) em todo o mundo, representando cerca de 56% do total de terras degradadas, enquanto a erosão eólica afeta cerca de 28% do total de terras degradadas (BLANCO; LAL, 2008).

Segundo Lepsch (2002, p. 149) a superfície da Terra não é estática e está sujeita a progressivas modificações. Os rios, os ventos, as geleiras e as enxurradas das chuvas, deslocam, transportam e depositam de maneira contínua as partículas do solo, dando origem à chamada “erosão natural” (ou geológica). Em seu estado natural associada a um clima úmido, a vegetação cobre o solo, protegendo-o, fazendo com que a remoção de terra ocorra de forma lenta e gradual. Naturalmente, o desgaste erosivo é compensado e equilibrado pela renovação que ocorre ao longo dos processos de formação do solo. Entretanto, quando ocorre a intervenção humana, há uma extinção desse equilíbrio natural. Fatores como o aumento populacional em larga escala, com consequente intensificação da agricultura e consequente retirada da cobertura vegetal para o cultivo, são determinantes na ocorrência da chamada “erosão acelerada”, referente aos processos de desgaste influenciados pela ação do homem.

A erosão hídrica, ou seja, o desgaste do solo causado pela ação das águas da chuva é a mais importante no Brasil. O volume e a velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva, sendo a intensidade o fator pluviométrico mais importante no processo erosivo. A mecânica da erosão pela água se dá através de três etapas: desprendimento das partículas da massa do solo; transporte das partículas separadas vertentes abaixo por flutuação, rolamento e salpicamento e, por último, deposição das partículas transportadas em algum local mais baixo do relevo (COOPER, 2008, p. 11).

A erosão, em seu aspecto físico, é simplesmente a realização de uma quantidade de trabalho no desprendimento do material de solo e no seu transporte. O processo erosivo se inicia quando as gotas de chuva colidem com a superfície do solo e destroem os agregados e termina com as seguintes etapas: as partículas do solo se soltam; o material desprendido é transportado e finalmente, há um depósito desse material. Nas duas primeiras etapas não há uma quantificação em termos de unidades, já na última etapa pode-se quantificar em peso ou em volume por unidade de área a quantidade depositada, ou ainda, em toneladas por hectare (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010, p. 70). Essa quantificação será abordada no tópico 3.3.

A erosão hídrica pode ocorrer sob as seguintes formas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010):

- a) erosão laminar: remoção de camadas delgadas de solo sobre uma área por completo. É a forma de erosão menos notada, no entanto, a mais perigosa. A erosão laminar arrasta primeiro as partículas mais leves do solo, as quais são a de maior valor, influenciando diretamente no arraste de partículas extremamente importantes para a fertilidade do solo;
- b) erosão em sulcos: resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno, fazendo com que a enxurrada, concentrada em alguns pontos do terreno, alcance volume e velocidade suficientes para formar riscos mais ou menos profundos. Em fase inicial, os sulcos podem ser desfeitos com operações normais de preparo de solo, no entanto, em estágio avançado estes atingem profundidades grandes o suficiente para impedir a ação das máquinas agrícolas;
- c) voçorocas: são caracterizadas como a forma espetacular de erosão, ocasionadas por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano no mesmo sulco, ampliando-o e deslocando grandes porções de solo, formando imensas cavidades em extensão e profundidade.

Ao longo do tempo, os processos do ciclo hidrossedimentológico moldam as feições das bacias hidrográficas, deixando-as como conhecemos hoje, sem a intervenção do homem. No entanto, como já frisado, a presença humana e suas ações alteram este quadro, acelerando a erosão natural. As atividades com maior potencial de impacto no ciclo hidrossedimentológico são: desmatamento, agricultura, urbanização, mineração, construção de estradas, retificação e/ou canalização de cursos d'água e construção de barragens (TUCCI, 2009).

Ainda segundo Tucci (2009), as manifestações mais fáceis de serem visualizadas decorrentes das alterações causadas pela erosão são: formação de voçorocas, a qual foi descrita anteriormente; erosão das margens dos rios; e assoreamento de corpos d'água.

Para solucionar ou evitar que estes e outros problemas ocorram é fundamental detectar a tempo as alterações que podem estar ocorrendo no ciclo hidrossedimentológico. O modo mais prático de fazê-lo é medindo os volumes acumulados de sedimentos em detrimento dos volumes de água correspondentes, obtendo-se a evolução e os possíveis desequilíbrios do ciclo. Para tal, o uso de softwares (objeto do presente estudo) é uma das maneiras mais prática e de menor custo da atualidade.

3.3 Equações de Perdas de Solo

Para quantificar e avaliar a quantidade de perda de solo de uma determinada área são utilizadas equações empíricas, cada vez mais aprimoradas, com o objetivo de minimizar os impactos negativos, através da adoção de práticas conservacionistas, diminuindo o máximo possível o desgaste do solo.

Para que seja possível a quantificação das perdas de solo, é fundamental que se conheçam as relações entre a causa da perda de solo e os fatores que ajudam na sua redução. Assim, torna-se possível realizar o planejamento conservacionista da região de interesse. No presente trabalho, como o SWAT a utiliza, optou-se pela descrição da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS ou *MUSLE – Modified Universal Soil Loss Equation*), possibilitando a quantificação da perda de solo na bacia de estudo, resultando num posterior planejamento conservacionista da área atingida por voçorocas.

Antes de prosseguir com a explanação da *MUSLE* será necessário abordar as principais características e parâmetros da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou

USLE – *Universal Soil Loss Equation*), a qual deu origem àquela e utiliza parâmetros em comum com esta.

3.3.1 EUPS (Equação Universal de Perda de Solo)

Os primeiros trabalhos para desenvolver equações que avaliassem as perdas de solo de uma área datam de 1940 na região do Corn Belt dos Estados Unidos. O processo empregado a partir daquela época até 1956 era conhecido por método do plantio em declives (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Bertoni & Lombardi Neto (2010) ressaltaram os estudos dos autores Zingg, Smith, Browning e Wischmeier & Smith acerca das equações de perdas de solo. Zingg publicou uma equação relacionando a intensidade de perdas de solo com o comprimento e com o grau de declive do terreno. Smith acrescentou-lhe os fatores práticas conservacionistas e culturais e instituiu o conceito de limite específico de perdas de solo, a fim de organizar um método gráfico para estabelecer as práticas conservacionistas para a sua região de trabalho. Browning et al. acrescentaram os fatores erodibilidade do solo e de manejo, preparando ainda um conjunto de tabelas para simplificar o seu uso no campo.

Em 1954 no *Runoff and Soil-Loss Data Center*, do *Agricultural Research Service*, foi desenvolvida a atual Equação de Perdas de Solo, cujo aperfeiçoamento resultou da reunião e interpretação analítica dos dados básicos de perdas de solo e de água disponíveis em vários locais dos EUA. Essas análises determinaram várias melhorias de importância que foram incluídas na equação, tais como: índice de erosão de chuva; método de avaliar os efeitos do manejo de uma cultura com vistas às condições climáticas locais; um fator quantitativo de erodibilidade do solo; método que leva em conta os efeitos de interpretações de certas variáveis, tais como nível de produtividade, sequência de culturas e manejo dos resíduos. Em consequência dessas modificações, a equação superou as restrições climáticas ou geográficas próprias dos primeiros estudos e o modelo aperfeiçoado passou a denominar-se Equação Universal de Perdas de Solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Bertoni & Lombardi Neto (2010) ainda ressaltaram que Wischmeier & Smith revisaram essa equação, atualizaram-na e incorporaram-lhe novos dados disponíveis. No Brasil, os trabalhos iniciais referentes à Equação de Perdas de Solo foram os de Bertoni et al. utilizando os dados existentes para o Estado de São Paulo. A partir de 1975 alguns autores vêm avaliando os fatores da equação para outras regiões.

A equação de perdas de solo desenvolvida por Wischmeier & Smith é expressa por (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Cada um dos seis parâmetros será discutido a seguir, com base nos estudos de Bertoni & Lombardi Neto (2010). Cabe aqui salientar que os parâmetros utilizados na *MUSLE* são os mesmos, com exceção do fator produto A (perda de solo), que é substituído pelo fator Y (aporte de sedimentos), e do fator R (erosividade da chuva), o qual é substituído por um fator de escoamento que será explicado adiante. Cabe ainda ressaltar que os fatores R, K, LS são dependentes das condições naturais do clima, do solo e do relevo, não sendo passíveis de intervenção humana, formando, portanto, o Potencial Natural de Erosão (PNE) de uma região.

3.3.1.1 “A” (perda de solo)

Este parâmetro é o objetivo da equação: quantificar a perda de solo. Sua unidade é dada em toneladas/hectares (t/ha).

3.3.1.2 “R” (erosividade da chuva)

O fator chuva é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção.

Estudos demonstraram que se os outros fatores – exceto o fator chuva – forem mantidos constantes, as perdas de solo ocasionadas pelas chuvas nos terrenos cultivados são diretamente proporcionais ao valor do produto das seguintes características: a energia cinética total da chuva e sua intensidade máxima em trinta minutos (EI). Tal produto representa um termo de interação que mede como a erosão, o salpico e a turbulência se combinam com a enxurrada para transportarem as partículas de solo desprendidas. O índice de erosão EI é considerada a melhor relação para medição do potencial erosivo da chuva.

O valor do fator de chuva (R) para uma área é a média dos valores anuais de EI de um período de tempo de vinte anos ou mais.

O índice de erosão pode ser calculado através da equação proposta por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992):

$$EI = 67,355 \cdot (r^2/P)^{0,85}$$

Na qual:

EI = média mensal do índice de erosão [MJ.mm/ha.h.ano];

r = precipitação média mensal [mm];

P = precipitação média anual [mm].

Pode-se também estimar as perdas de solo para uma chuva individual ou outros períodos usando o valor apropriado de R . No caso de regiões com dados pluviográficos escassos, autores tentaram correlacionar o índice de erosão com fatores climáticos, que são de fácil medida e que não requerem registros de intensidade da chuva. (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

3.3.1.3 “K” (erodibilidade do solo)

Erosão do solo e erodibilidade do solo são conceitos diferentes. A intensidade de erosão de uma determinada área pode ser influenciada pelo declive, pelas características das chuvas, pela cobertura vegetal e manejo, enquanto que a erodibilidade é propriamente a influência das propriedades do solo, sendo uns mais erodíveis que outros. As propriedades que influenciam na erodibilidade são aquelas que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento.

O fator erodibilidade do solo (K) tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas unitárias, sendo expresso, como perda de solo (A), por unidade de índice de erosão da chuva (EI).

O valor do fator K é determinado experimentalmente em parcelas unitárias de 25 m de comprimento e 9% de declividade uniforme preparada no sentido do declive, deixada livre de vegetação num período de até 2 anos ou até a decomposição dos resíduos da cultura anterior.

3.3.1.4 “LS” (comprimento e grau de declive)

A intensidade da erosão pela água é influenciada diretamente pelo comprimento do declive e também por seu gradiente. Apesar de representados separadamente na equação, eles são adotados como um único elemento: o fator topográfico. O fator topográfico LS é a relação esperada de perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer em relação a perdas de solo correspondentes de uma parcela unitária de 25 m de comprimento com 9% de declive. O cálculo deste parâmetro foi baseado nas fórmulas obtidas por Bertoni chegando-se à seguinte equação principal:

$$LS = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18}$$

Na qual:

LS = fator topográfico;

C = comprimento da rampa [m];

D = grau de declive [%].

3.3.1.5 “C” (*uso-manejo do solo*)

Este parâmetro é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto e cultivado. Se a área estiver cultivada, as perdas serão reduzidas devido à proteção que a cultura oferece ao solo. Esse fator depende das combinações de cobertura vegetal, da sequência de cultura, das práticas de manejo e do crescimento e desenvolvimento da cultura durante o período das chuvas. O seu valor varia de zero, sendo uma área totalmente coberta, a um, representando um solo nu.

A proteção da cobertura vegetal não só depende do tipo de vegetação, do *stand* e do seu desenvolvimento como, também, varia grandemente nos diferentes meses e estações do ano. Para padronizar e deixar mais prática a avaliação dos fatores de manejo, Bertoni e Lombardi Neto (2010) dividiram o ano agrícola em cinco períodos ou estádios de cultura, para que os efeitos de cobertura e manejo possam ser considerados aproximadamente uniformes dentro de cada período:

- a) período D – preparo do solo: do preparo ao plantio;
- b) período 1 – plantio: do plantio a um mês após o plantio;
- c) período 2 – estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio;
- d) período 3 – crescimento e maturação: de dois meses após o plantio até a colheita;
- e) período 4 – resíduo: da colheita até o preparo do solo.

As intensidades de perda de solo são computadas para cada um desses estádios e para cada cultura sob várias condições, como demonstrado no Quadro 1. É através da mudança na cobertura, no uso e no manejo que se faz das terras que a perda de solo pode ser reduzida. Portanto o fator C é determinante na quantidade de erosão de uma determinada área.

Quadro 1 - Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta.

CULTURA	RAZÃO DE PERDA DE SOLO POR PERÍODO DE ESTÁGIO DE CULTURA (%)				
	D	1	2	3	4
Pasto	-	-	0,4 - 4	-	-
Soja/Rotação Milho	15	12	20	4	3
Soja/Rotação Milho, Plantio Direto	-	8	10	4	3
Algodão/Rotação Soja	20	20	30	15	13
Milho Contínuo/Palha Superficial	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo convencional	40	60	40	50	20
Soja, contínuo convencional	35	30	20	20	5

Fonte: adaptado de Bertoni & Lombardi Neto (2010).

3.3.1.6 “P” (prática conservacionista)

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2010, p. 266), este fator relaciona a intensidade esperada de perda de solo com determinadas práticas conservacionistas e com aquelas quando a cultura está plantada morro abaixo, ou seja, no sentido do declive. As práticas conservacionistas mais comuns são: plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas. O Quadro 2 apresenta os valores de P para determinadas práticas.

Quadro 2 - Valores de P da equação de perda de solo para algumas práticas conservacionistas.

PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS	VALOR DE P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: adaptado de Bertoni & Lombardi Neto (2010).

3.3.2 MEUPS (Equação Universal de Perda de Solo Modificada) ou MUSLE

$$Y = 89,6 \cdot (Q \times qp)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot LS \cdot P$$

Na qual:

Y = aporte de sedimentos em um determinado exutório da bacia, após um evento de precipitação [toneladas];

Q = volume de escoamento superficial total [m³];

qp = vazão de pico do hidrograma resultante [m³/s];

K = erodibilidade do solo [t.ha.h/ha.Mj.mm];

C = fator uso e manejo das culturas [adimensional];

LS = fator topográfico [adimensional];

P = fator práticas conservacionistas [adimensional];

O volume de escoamento superficial (Q) pode ser obtido da seguinte maneira (SARTORI et al, 2005b):

$$Q = (P - 0,2 \cdot S)^2 / (P + 0,8 \cdot S)$$

Onde:

Q = volume de escoamento superficial de um evento de precipitação (m³);

P = volume de precipitação (mm);

S = diferença potencial máxima entre a precipitação e o escoamento, a partir do início da precipitação:

$$S = (25400/CN) - 254$$

Tal expressão foi obtida em unidades métricas; a equação original, em unidades inglesas, estabelece o valor de CN numa escala que varia de 1 a 100. Esta escala retrata as condições de cobertura e solo, variando desde uma cobertura muito impermeável (limite superior) até uma cobertura completamente permeável (limite inferior). Esse fator foi tabelado para diferentes tipos de solo e cobertura (TUCCI, 2010).

Para melhor compreensão das equações anteriores, seguem outras duas equações (SARTORI, 2004).

$$qp = 2,083 \cdot (A \cdot Q)/tp \quad \text{e} \quad tp = 2/3 \cdot tc$$

Nas quais:

qp = vazão de pico do hidrograma resultante (m³/s);

A = área de drenagem (km²);

Q = precipitação excedente (cm);

tp = tempo de pico (horas);

tc = tempo de concentração (horas).

Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005a) apresentaram uma nova proposta para extensão da Classificação Hidrológica dos Solos Brasileiros para estimativa de chuvas excedentes com base no Método do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (SCS – *Soil Conservation Service*) para aplicação nas condições dos solos brasileiros. Estes autores utilizaram e analisaram os perfis representativos já existentes dos grandes grupos de solos registrados no Estado de São Paulo e propuseram um enquadramento em primeiro nível categórico (Ordem dos Solos) assim como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.

TIPO DE SOLO (Grupo Hidrológico)	CARACTERÍSTICAS
A	- Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); - Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; - Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); - Solos de textura média; - Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; - Solos bem drenados ou excessivamente drenados; - Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa. Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	- Solos profundos (100 a 200 cm); - Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; - Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; - Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; - Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; - Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMA-RELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.

Continua

Quadro 3 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.

Continuação

TIPO DE SOLO (Grupo Hidrológico)	CARACTERÍSTICAS
C	- Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); - Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; - São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; - Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. Enquadra-se neste grupo o: ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	- Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância à erosão; - Solos rasos (prof. < 50 cm); - Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; - Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); - Solos orgânicos. Enquadra-se neste grupo o: NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: adaptado de Sartori (2004).

O Parâmetro S varia em função da relação solo/uso/manejo/declividade e também com o tempo, em função do conteúdo de água no solo. Este parâmetro é, portanto, derivado do índice número da curva (CN) desenvolvido pelo USDA-SCS (*Soil Conservation Service*, 1972) (PEREIRA, 2010).

Os valores de CN foram descritos por Tucci (2009) conforme Quadros 3, 4 e 5.

Quadro 4 - Valores do parâmetro CN (curva-número) para bacias rurais.

USO DO SOLO	SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO (*)			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	76	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras/estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: adaptado de Tucci (2009).

Quadro 5 - Valores de CN (curva-número) para bacias urbanas e suburbanas.

USO OU COBERTURA DO SOLO	SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO (*)			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	Em más condições	68	79	86	89
	Em boas condições	39	61	74	80
Prado	Em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Arruamentos e estradas	Asfaltadas com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	De paralelepípedos	76	85	89	91
	De terra	72	82	87	89
Zonas residenciais	65% impermeável (lotes < 500 m ²)	77	85	90	92
	38% impermeável (lotes de 1000 m ²)	61	75	83	87
	30% impermeável (lotes de 1300 m ²)	57	72	81	86
	25% impermeável (lotes de 2000 m ²)	54	70	80	85
	20% impermeável (lotes de 4000 m ²)	51	68	79	84

Fonte: adaptado de Tucci (2009).

3.4 Modelagem – SWAT

Segundo Von Sperling (2007), um modelo pode ser caracterizado como uma representação da realidade; uma tradução simplificada e generalizada do que se afigura como sendo as características mais importantes de uma situação do mundo real; ou uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual – reduzir a variedade e complexidade do mundo real a um nível que se pode entender e representar. Modelos ambientais objetivam representar a realidade tal como é observada ou medida, e por isto dificilmente podem representar toda a complexidade das múltiplas interações nos sistemas ambientais, várias delas não mensuráveis ou quantificáveis.

Já Christofletti (1999), definiu a palavra “modelo” como sendo: "qualquer representação simplificada da realidade" ou de um aspecto da realidade que surja conforme interesse do pesquisador. Além disso, deve possibilitar a reconstrução da realidade, prevendo um comportamento, uma transformação ou uma evolução.

O uso da modelagem espacial representa uma importante ferramenta para avaliar cenários de mudanças de curto e longo prazo (GALHARTE, 2011). O emprego de modelos matemáticos faz-se necessário para prever o processo erosivo, tanto para sua prevenção como para seu controle. O objetivo da modelagem é compreender os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica.

Quando bem utilizada, a simulação torna-se uma ferramenta integradora da complexidade dos sistemas ambientais e auxilia no entendimento da dinâmica dos processos naturais (SANTOS et al., 2013).

A principal vantagem da aplicação de modelos é a possibilidade de análise de diferentes cenários, mesmo que ainda não explorados em experimentos reais, de maneira rápida e precisa. Além disso, essa simulação está associada a baixo custo, pois na maioria das vezes, executar o software é extremamente menos custoso do que uma investigação real (MACHADO; VETORAZZI; XAVIER, 2003).

A limitação ao uso de modelos gira em torno da dificuldade em trabalhar grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Portanto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) são empregados na criação do banco de dados desses modelos. Tais tecnologias representam um passo essencial para o manejo de bacias hidrográficas, através da visualização de cenários passados, atuais, e da simulação de cenários futuros com baixo custo e de forma rápida (GRIGG, 1996 apud MACHADO et al., 2003).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) são ferramentas capazes de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões de modo eficiente, economizando recursos e tempo. Com SIG's torna-se possível a interação de dados de diversas fontes (imagens de satélite, modelos de elevação digital, mapas topográficos, mapas de solos, mapas de uso de solo, hidrografia, etc.) e em diferentes escalas. Os resultados finais geralmente são apresentados sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas (FERRIGO, 2011).

Com o objetivo de simular cenários alternativos de uso e ocupação do solo o modelo ArcSWAT que é uma interface do ArcGIS para o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), é de grande importância para esse tipo de modelagem, pois com a entrada de um extenso banco de dados construído, o software é capaz de prever cenários futuros e compará-los com cenários passados quanto à produção de sedimentos de uma determinada bacia hidrográfica.

Segundo Minoti (2006), o SWAT é um simulador desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) dos Estados Unidos, representado por inúmeros modelos matemáticos fundamentados no conhecimento das características físicas de bacias hidrográficas agrícolas. Seu objetivo é prever o impacto das práticas de manejo do solo nos ambientes aquáticos superficiais e subterrâneos em bacias de drenagem complexas, com alternância dos tipos de solo, do uso do solo e do manejo em longos períodos de tempo.

O modelo SWAT permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica e também que estas sejam subdivididas em sub-bacias, as quais são agrupadas com características hidrográficas semelhantes (MINOTI, 2006).

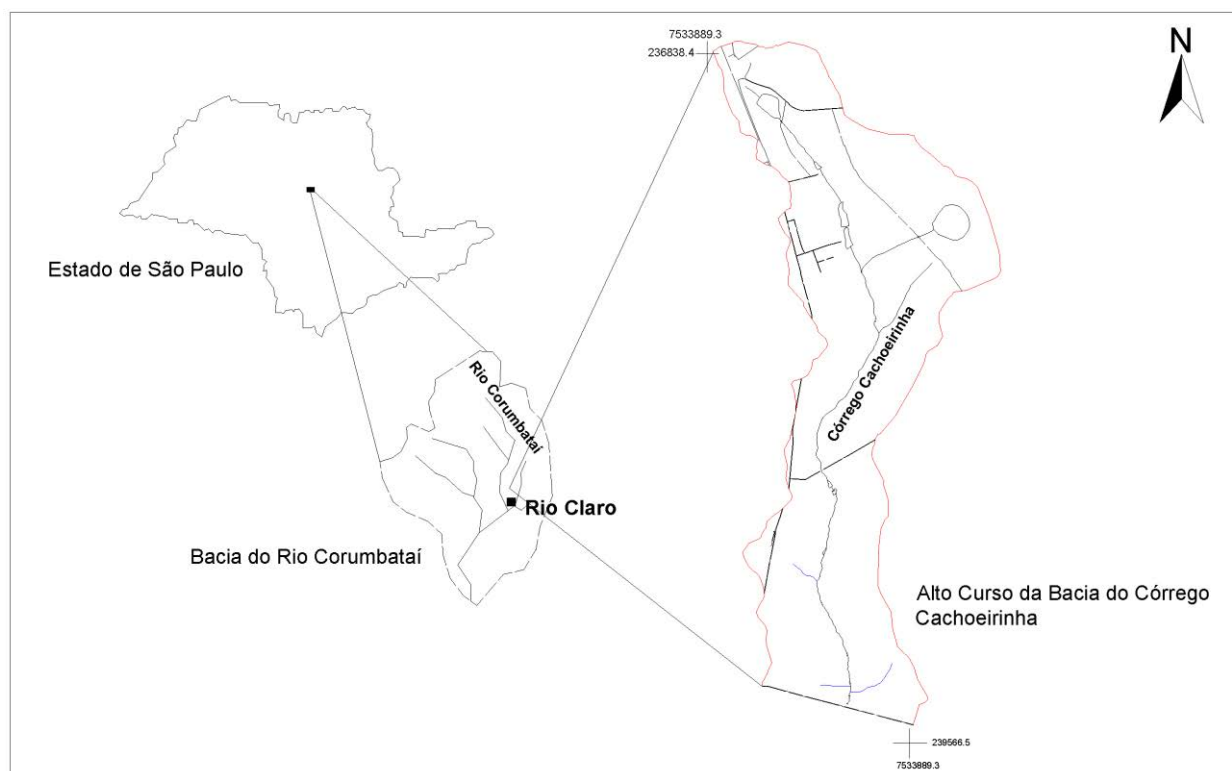
O principal agente que permite a simulação do modelo é o balanço hídrico, dividindo a bacia em duas fases: fase terrestre do ciclo hidrológico e fase aquática. A terrestre controla a quantidade de água e as cargas de sedimentos, nutrientes e pesticidas que atingem o canal principal de cada sub-bacia. Já a aquática relaciona-se com o movimento de água, sedimentos, entre outros, através da rede de canais em direção ao exutório da bacia. Os componentes apresentados pelo modelo são: clima, ciclo hidrológico, nutrientes e pesticidas, erosão, cobertura do solo e crescimento de plantas, práticas de manejo, processos no canal principal e corpos d'água.

Arnold (1998) definiu o SWAT como uma base física, um modelo hidrológico desenvolvido para prever o impacto das práticas de manejo das terras em relação às águas, aos sedimentos e aos rendimentos agrícolas químicos em grandes bacias hidrográficas complexas com diferentes tipos de solos, uso da terra e condições de gestão durante longos períodos de tempo. Para a simulação, um divisor de águas é subdividido em uma série de sub-bacias homogêneas (unidades de resposta hidrológica semelhante ou HRUs), com solo e propriedades únicas de uso da terra. As informações de entrada para cada sub-bacia são agrupadas em categorias climáticas; cobertura do solo; tipo de solo; gestão dentro da sub-bacia; lagoas e reservatórios; águas subterrâneas; e drenagem da sub-bacia. A carga do escoamento das águas, dos sedimentos, dos nutrientes e pesticidas para o canal principal em cada sub-bacia é simulado considerando o efeito de vários processos físicos que influenciam a hidrologia.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do presente estudo localiza-se entre as coordenadas geográficas 22°17'30'' e 22°17'39'' de latitude S e 47°31' e 47°33' de longitude W e é denominada Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha, compreendendo uma área segundo Scalzitti & Mendes (1995 apud BEGA, 2010, p. 26) de aproximadamente 18,67 km², localizada no município de Rio Claro, no Estado de SP (Figura 2). A nascente do Córrego está situada no Horto Municipal de Ajapi, a 660 metros de altitude, enquanto que sua foz está localizada numa área de expansão urbana, a 580 metros de altitude. Sua extensão é calculada em aproximadamente 15 km.

Figura 2 - Localização da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha. Rio Claro - SP (Sem escala).



Fonte: Silva (2008/2009).

A bacia do Córrego Cachoeirinha pertence à bacia do Rio Corumbataí, a qual, por sua vez situa-se na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, na Depressão Periférica Paulista, centro-leste do Estado de São Paulo, em área de afloramento de rochas paleozóicas (Grupo Itararé, Formação Tatuí e Grupo Passa Dois – formações Irati e Corumbataí), mesozóicas (Formação Pirambóia, Grupo São Bento – formações Botucatu e Serra Geral, rochas magmáticas intrusivas – diques e soleiras e Formação Itaqueri) e cenozóicas (Formação Rio Claro). A bacia em estudo pertence à Formação Rio Claro (BEGA, 2010).

Para efeito de caracterização do potencial erosivo da área fez-se necessário considerar os seguintes tipos de dados: pedológicos, tipos de uso e ocupação do solo e climáticos.

A Formação Rio Claro situa-se sobre diferentes unidades estratigráficas, dependendo do grau de erosão do topo destas unidades. Compõe-se por arenitos mal selecionados, amarelo-avermelhados, friáveis, por vezes com estratificações cruzadas e níveis conglomeráticos. É comum ocorrer na base da unidade, uma grande quantidade de seixos, principalmente de quartzo e quartzito (COTTAS, 1983).

As características desta unidade levam a analisá-la como tendo sido depositada em condições continentais, maiormente fluviais (localmente com pequenos lagos) em clima semi-árido. Um fato importante é a presença atual de várias lagoas desenvolvidas sobre seus depósitos, além de extensas voçorocas (ZAINE; PERINOTTO, 1996).

Dados retirados do Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí comprovam que há ocorrência de dois tipos pedológicos principais na Formação Rio Claro: Argissolos Vermelho-Amarelo e Latossolos Vermelho-Amarelo. Ambos possuem, segundo Zaine (2000), predominância de textura arenosa, são bem drenados, possuem lixiviação e infiltração altas, são pobres em matéria orgânica, são solos ácidos e pouco adequados para a agricultura.

Segundo Bega (2010) os dois tipos de solo citados, quando associados a relevos planos ou pouco acidentados, podem ser utilizados para a agricultura, pastagens e reflorestamentos, porém quando em relevos muito acidentados, favorecem a ocorrência de processos erosivos.

Segundo Koffler et al (1993 apud SILVA, 2008/2009, p. 8), na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha desenvolvem-se solos somente do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, o qual caracteriza-se como não hidromórfico, com horizontes B latossólicos. Ainda apresenta alta profundidade e possui seqüência de horizontes A – Bw – C com visível distinção de cor. Em áreas com relevo acidentado, a classe pedológica em questão oferece forte risco de erosão.

Foram identificados os seguintes tipos de uso e ocupação do solo na bacia em estudo: área urbana, construção rural, cana-de-açúcar, horticultura, cultura anual, café, citrus, pastagem, silvicultura, mata nativa, cobertura herbácea e solo exposto.

O clima da Bacia, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, sub-tropical, seco no inverno e chuvoso no verão. No mês de Janeiro, a variação se verifica entre as médias de 20°C e 24°C e no mês de Julho as médias distribuem-se entre 15°C e 17°C, com média das

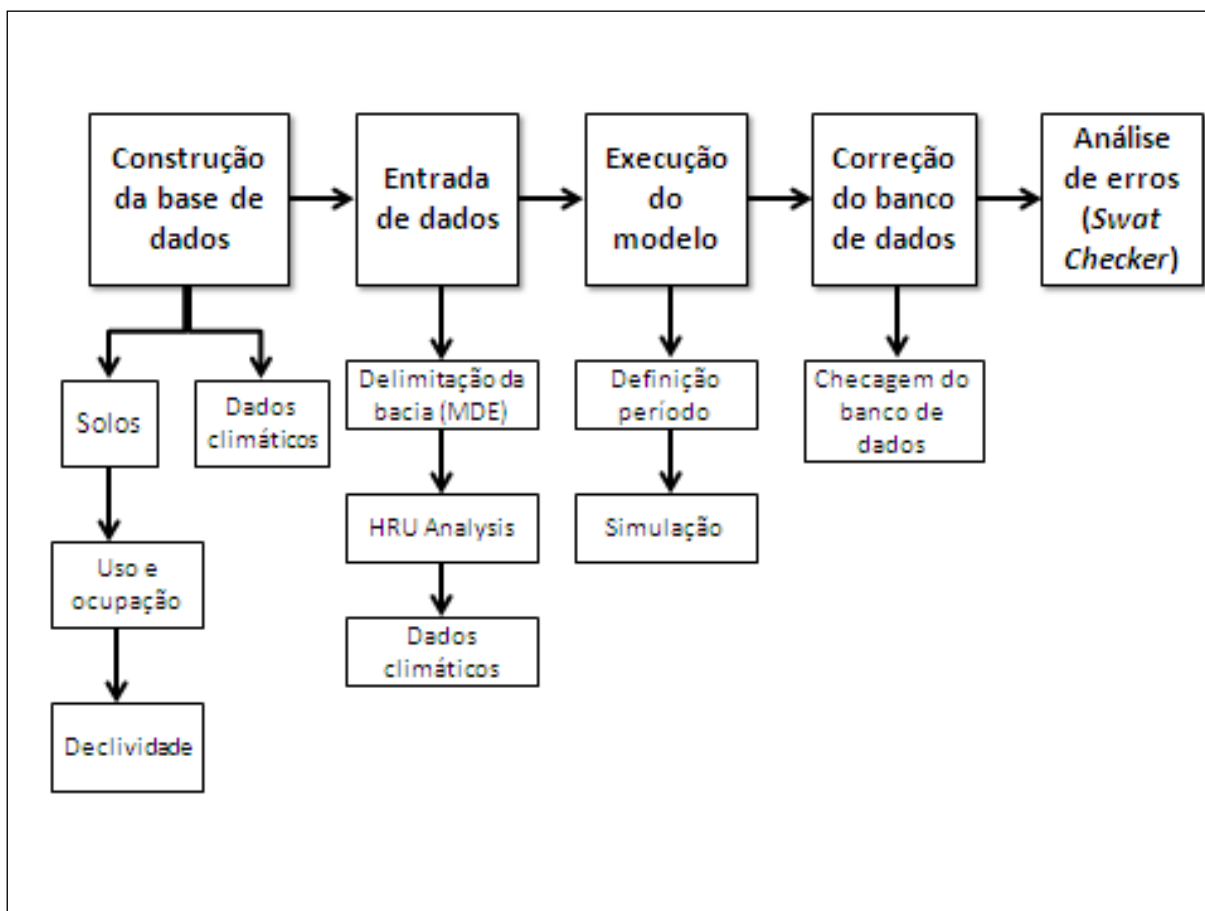
máximas em 30 °C. A dinâmica pluvial tem grande influência sobre os processos erosivos, pois o impacto da gota da chuva é o principal agente desagregador das partículas do solo.

Os elementos litológicos, pedológicos, climáticos e de uso e ocupação do solo conferem processos de desgaste nos solos da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha. A susceptibilidade à erosão da bacia em estudo e as alternativas para um melhor manejo da área serão analisada através de modelagem com base nos próximos procedimentos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho pode ser representada pelo fluxograma abaixo (Figura 3), o qual demonstra as etapas de execução do modelo.

Figura 3 – Fluxograma metodológico das etapas do SWAT.



Fonte: elaborado pela autora (2014).

5.1 Construção da base de dados

O software utilizado para a modelagem proposta no presente trabalho foi o *ArcSWAT 2012.10.1.14*, o qual é uma interface do *ArcMap 10.1*. O software utilizado necessita de dados tabulares e de planos de informação para sua simulação. Os planos de informação são: Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa pedológico e mapa de uso e ocupação da terra da área estudada, os quais são inseridos diretamente na interface, através da seleção por pastas/diretórios.

Todas as cartas necessárias para a confecção do MDE e dos mapas pedológico e de uso e ocupação foram disponibilizadas por Silva (2008/2009). As cartas se encontravam na escala 1:10.000 e as folhas que contemplam a região de estudo são as seguintes, datadas de

1979: Ajapí (SF-23-Y-A-I-4-NE-B), Granja Ipê (SF-23-Y-A-I-4-NE-D) e Bairro Cachoeirinha (SF-23-Y-A-I-4-NE-F). Também foram disponibilizados arquivos, já na extensão *shapefile*, a partir dos quais pôde ser elaborada toda a base cartográfica necessária ao projeto. A partir do software *ArcMap 10.1* foi possível criar todos os arquivos necessários: delimitação da bacia (máscara), curvas de nível para elaboração do MDE, carta de uso e ocupação do solo e pedologia.

Já os dados tabulares, os quais serão descritos a seguir, são inseridos diretamente no banco de dados do software, através da criação de novas siglas e novos parâmetros de acordo com a realidade brasileira e da área estudada. Esta etapa foi feita no item *Edit SWAT Input* na própria interface do software.

Com relação a estes dados tabulares, o SWAT necessita de dados de solos, dados climáticos e dados da curva-número (CN), ou seja, a curva de escoamento superficial utilizada dentro do software pelo modelo matemático SCS. Estes foram obtidos e inseridos no banco de dados do software da seguinte maneira, conforme descrito por Galharte (2011):

- a) dados de solo: número de camadas de solo; grupo hidrológico; máxima profundidade da raiz no perfil do solo; profundidade das camadas de solo; densidade; capacidade de água disponível; teor de carbono orgânico; condutividade hidráulica saturada; teores de argila, silte, areia e fragmentos de rocha; albedo; fator erodibilidade do solo (fator K discutido no item 3.3.3). Os atributos físicos do Latossolo Vermelho-Amarelo foram retirados de Silva (2008/2009) e Bega (2010). Alguns fatores possuem fórmulas específicas para seu cálculo, as quais o software é capaz de simular;
- b) dados climáticos: o SWAT demanda dados mensais e diários. Os dados diários são as médias diárias ou somas diárias dos fatores precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. Já os dados mensais se referem às médias mensais das temperaturas totais, das máximas e mínimas diárias; ao desvio padrão para as temperaturas totais, as máximas e as mínimas diárias de cada mês; probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos por mês; probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos por mês; média mensal de dias de precipitação; valor máximo de meia hora de chuva em todo período; média de radiação solar diária; média diária do ponto de orvalho; média diária da velocidade do vento. A aquisição dos dados climáticos foi feita através de um Termo de Solicitação (<http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/estacao.php>) enviado ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA), localizado no

Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP Rio Claro. Os dados recebidos foram de precipitação, temperaturas máxima e mínima e umidade relativa, os quais foram organizados e analisados através do software Microsoft Office Excel, no período de 1994 a 2010. O SWAT exige que seja especificada a localização geográfica da estação (coordenadas), sua altitude e o número de anos que será analisado no estudo. A estação meteorológica do CEAPLA possui as seguintes características: latitude 22° 23'S, longitude 47° 32'W, altitude 626,5 m e 16 anos de dados disponibilizados.

- c) dados da curva-número (CN): no SWAT foram inseridos valores de CN relativos a cada tipo de escoamento superficial, dependendo do uso e do tipo do solo, conforme Quadros 3, 4 e 5.

5.2 Inserção de dados no modelo SWAT

Todo o banco de dados construído no item 5.1 foi inserido no modelo SWAT para simulação do cenário atual da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha. As etapas realizadas estão descritas detalhadamente nos próximos itens.

5.2.1 Delineamento da bacia hidrográfica (*Watershed Delineation*)

5.2.2.1 Inserção do MDE

Esta etapa consistiu em inserir o MDE no modelo. O MDE é uma representação matemática contínua da distribuição espacial das variações de altitude dentro de uma área, sendo obtido através das curvas de nível e pontos cotados. Na modelagem aqui apresentada, o MDE definiu o delineamento de sub-bacias e extraiu a rede de drenagem, permitindo caracterizar a velocidade do escoamento e a propagação dos sedimentos (UZEIKA, 2009).

5.2.2.2 Subdivisão da Bacia Hidrográfica

Para a divisão das subbacias o modelo utiliza o MDE inserido para criar os divisores d'água que delimitam as subbacias. No projeto criado, foram criadas 13 subbacias.

5.2.2.3 Definição do exutório total da bacia (*Stream definition*)

Por fim, foi pontuada a localização exata do exutório total da bacia, escolhendo um ponto no mapa.

5.2.2 Inserção dos dados de solo, uso e ocupação e declividade (*HRU Analysis*)

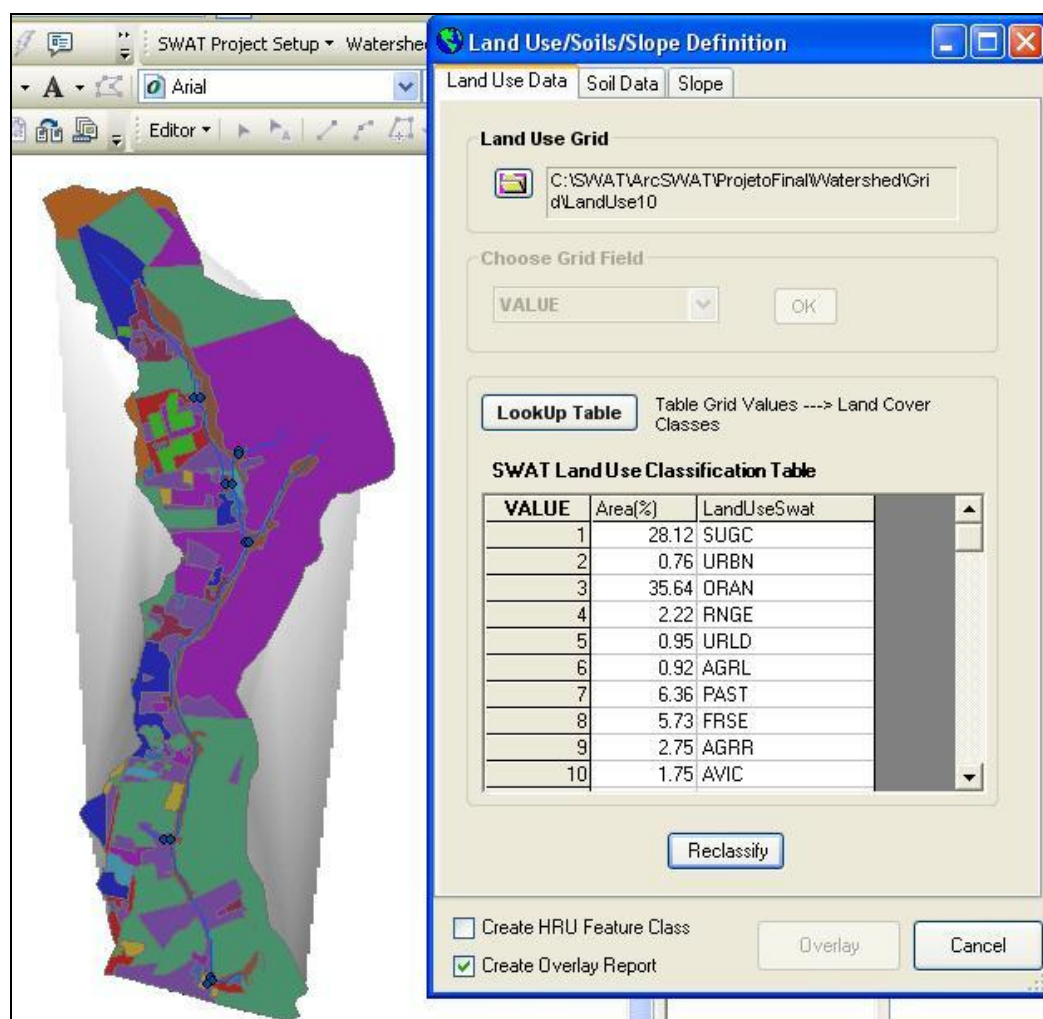
As HRU's são Unidades Hidrológicas Semelhantes, ou seja, são partes de uma subbacia que possuem uma única combinação de uso do solo e manejo.

5.2.2.1 Definição do uso e ocupação do solo (Land use definition)

Com o mapa de uso e ocupação da terra disponibilizado pelos professores Rodrigo e Cenira, fez-se as modificações necessárias para incluí-lo no software. Foi necessário modificar a tabela de atributos do arquivo *shapefile* para deixá-la de acordo com o requerido no Manual do usuário do programa SWAT (WINCHELL, 2013).

A tabela de classificação do uso do solo foi preenchida manualmente conforme os 12 tipos de uso que a bacia em estudo possui (eliminou-se o uso “área industrial”, por se tratar de menos de 1% da área total). Observar Figura 4.

Figura 4 - Definição do uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha no software SWAT.



Fonte: Fonte: *printscreen* feito pela autora durante inserção de dados no programa ArcSWAT.

5.2.2.2 Definição dos tipos de solo (Soil definition)

O mapa de solos foi confeccionado a partir da máscara da própria bacia do Cachoeirinha. Como mencionado na caracterização da área de estudo, o tipo de solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha é Latossolo Vermelho-Amarelo.

5.2.2.3 Definição das classes de declividade (*Slope definition*)

Para definir a declividade e suas respectivas classes para inserção no SWAT, utilizou-se as informações obtidas através de Silva (2008/2009). Em seu relatório, foram utilizadas técnicas propostas por De Biasi (1970), as quais, por meio da análise da carta topográfica, permitem reconhecer os declives do terreno. Os resultados obtidos em seu trabalho para o alto curso da bacia do cachoeirinha foram: valores de maior e menor declives registrados para a bacia = 35% e 2%, respectivamente. As classes estabelecidas por Silva (2008/2009) foram:

- Declividade < 3%: áreas suscetíveis à inundação;
- Declividade entre 3% a 6%: segundo De Biasi (1992), a partir de 5% é possível a urbanização sem restrições quanto à possibilidade de inundação;
- Declividade entre 6% a 12%: terrenos onde é possível a urbanização e a mecanização agrícola;
- Declive entre 12% e 25%: acima de 12% há sérias restrições à mecanização agrícola;
- Declive entre 25% e 30%: visa detalhar as informações sobre o declive do terreno e assim evitar um intervalo de classe muito amplo;
- Declive acima de 30%: área com restrições à urbanização.

Para efeito de classificação no SWAT, mesclou-se a quinta e sexta classe, ficando a classificação conforme Figura 5.

O fator LS (comprimento e declividade) é automaticamente estimado pelo modelo através do MDE (UZEIKA, 2009).

Figura 5 - Definição das classes de declividade no modelo SWAT.

Land Use/Soils/Slope Definition

Land Use Data | Soil Data | **Slope**

Slope Discretization

☐ Single Slope Watershed Min: 0,00 Mean: 4,92
Slope Stats: Max: 17,9 St Dev: 3,58

☒ Multiple Slope

Slope Classes

Number of Slope Classes: 5

Current Slope Class: 4 Class Upper Limit (%): 25 **Add**

SWAT Slope Classification Table

Class	> Lower Limit	<= Upper Limit
1	0	3
2	3	6
3	6	12
4	12	25
5	25	9999

Reclassify

☐ Create HRU Feature Class ☒ Create Overlay Report **Overlay** **Cancel**

Fonte: *printscreen* feito pela autora durante inserção de dados no programa ArcSWAT.

5.2.3 Inserção dos dados climáticos (*Write Input Tables*)

Os dados climáticos descritos no item 5.1 b, foram devidamente organizados e ajustados para correta inclusão no gerador climático *WGNmaker4.1.xlsm*, o qual é um macro do Excel, ou seja, um programa baseado em preenchimento de células de planilhas cuja saída são os dados necessários para inclusão no SWAT.

Através da leitura cuidadosa do manual *WGNmaker*, disponível em <http://swat.tamu.edu>, criaram-se os dados necessários para inserir no presente item (ARNOLD et al., 2012).

O macro utiliza 21 variáveis, as quais não cabem ser descritas no presente trabalho, porém são detalhadamente explicadas em Arnold et al (2012), descrevendo sua definição, bem como fórmulas e unidades.

5.2.4 Correção do banco de dados (*Edit SWAT Input*)

Após finalização da inserção dos dados tabulares e dos planos de informação, fez-se necessária a checagem do banco de dados (*Edit SWAT Input > Database*) para correção de possíveis parâmetros incorretos. Dois parâmetros que ainda não haviam sido contemplados e foram inseridos nesta etapa foram: K (erodibilidade do solo) e CP (práticas conservacionistas). Estes fatores foram inseridos conforme Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Fragmento de planilha utilizada por Silva (2008/2009).

Parcela	K
1	0,0148
2	0,0148
3	0,0148
4	0,0148
5	0,0148

Fonte: adaptada de Silva (2008/2009).

Tabela 2 - Valores de CP para as classes de uso e ocupação do solo na Alta bacia do Córrego Cachoeirinha.

Tipo de Uso e Ocupação	Valores de CP
Área urbana	0
Construção rural	0
Cana-de-açúcar	0,1
Horticultura	0,7678
Cultura anual	0,7678
Granja	0,1350
Citrus	0,1350
Pastagem	0,01
Cobertura herbácea	0,01
Silvicultura	0,0001
Mata nativa	0,00004
Solo exposto	1

Fonte: adaptada de Silva (2008/2009).

5.3 Simulação do modelo (*Swat simulation*)

Após inserção e correção de todos os dados necessários para a utilização do modelo, foi feita a simulação propriamente dita. Nesta etapa deve ser escolhida a data inicial e final da simulação, ou seja, 1/1/1994 e 31/12/2010, respectivamente. Por fim, rodou-se o modelo, a fim de se obter os resultados de escoamento e de análise hidrossedimentológica, os quais foram checados com o programa *SwatCheck*, cuja saída será detalhada no item a seguir.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foi feita com base nas saídas totais da bacia, focando no escoamento superficial, o qual determina como será a produção de sedimentos. Inicialmente foram analisadas as saídas de uso e ocupação, bem como os parâmetros de relevo da bacia estudada. Posteriormente, avaliou-se os resultados hidrológicos e climáticos e o aporte de sedimentos. Além disso, ao final deste item foi feita a comparação dos resultados com os trabalhos de Silva (2008/2009) e Bega (2010).

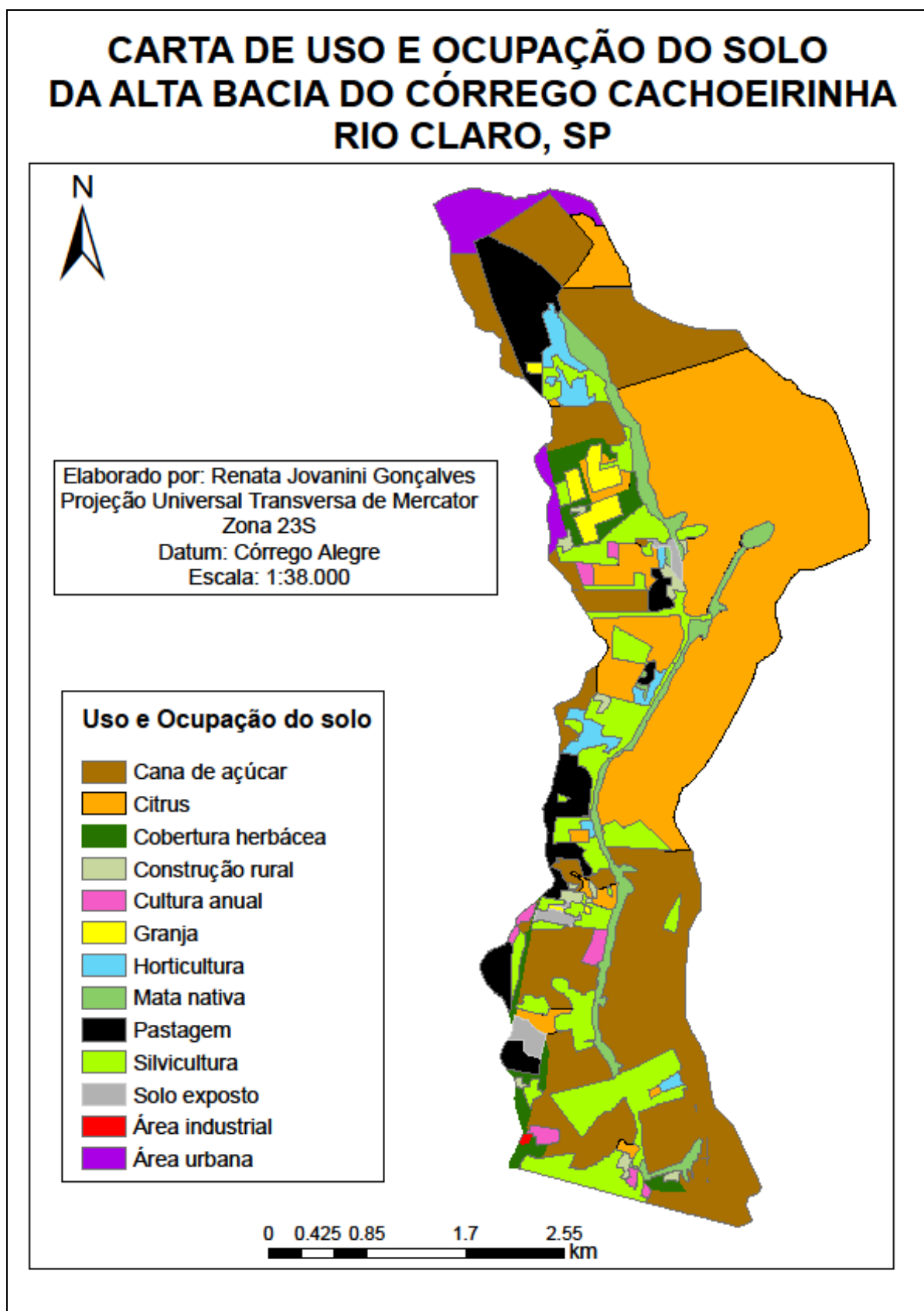
6.1 Análise das condições de uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha

Os usos e ocupação da bacia em estudo são os seguintes: área urbana, construção rural, cana-de-açúcar, horticultura, cultura anual, café, citrus, pastagem, silvicultura, mata nativa, cobertura herbácea e solo exposto. A carta representativa está contida na Figura 6.

Pode-se perceber que a maior ocupação por área se dá pelo Citrus, ficando em segundo lugar a cultura da cana-de-açúcar, estando esta última em estado de expansão nos últimos anos.

Os resultados de escoamento superficial obtidos para estes dois tipos de cultivo foram 116,91 mm/ano e 265,94 mm/ano, respectivamente. Essa análise nos permite afirmar que a perda de solo é maior onde há o cultivo da cana-de-açúcar, pois sabe-se que quanto maior o escoamento superficial, maior a perda de solo. O motivo para tal pode ser evidenciado em Silva (2008/2009), a qual diz que a citricultura é uma cultura permanente, enquanto que a cultura canavieira é anual, deixando o solo exposto nas entressafras. Isso significa que, em longo espaço de tempo, as perdas de solo tendem a ser maiores nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

Figura 6 - Carta de uso e ocupação do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.



Fonte: elaborada pela autora através do ArcMap 10.1 (2014).

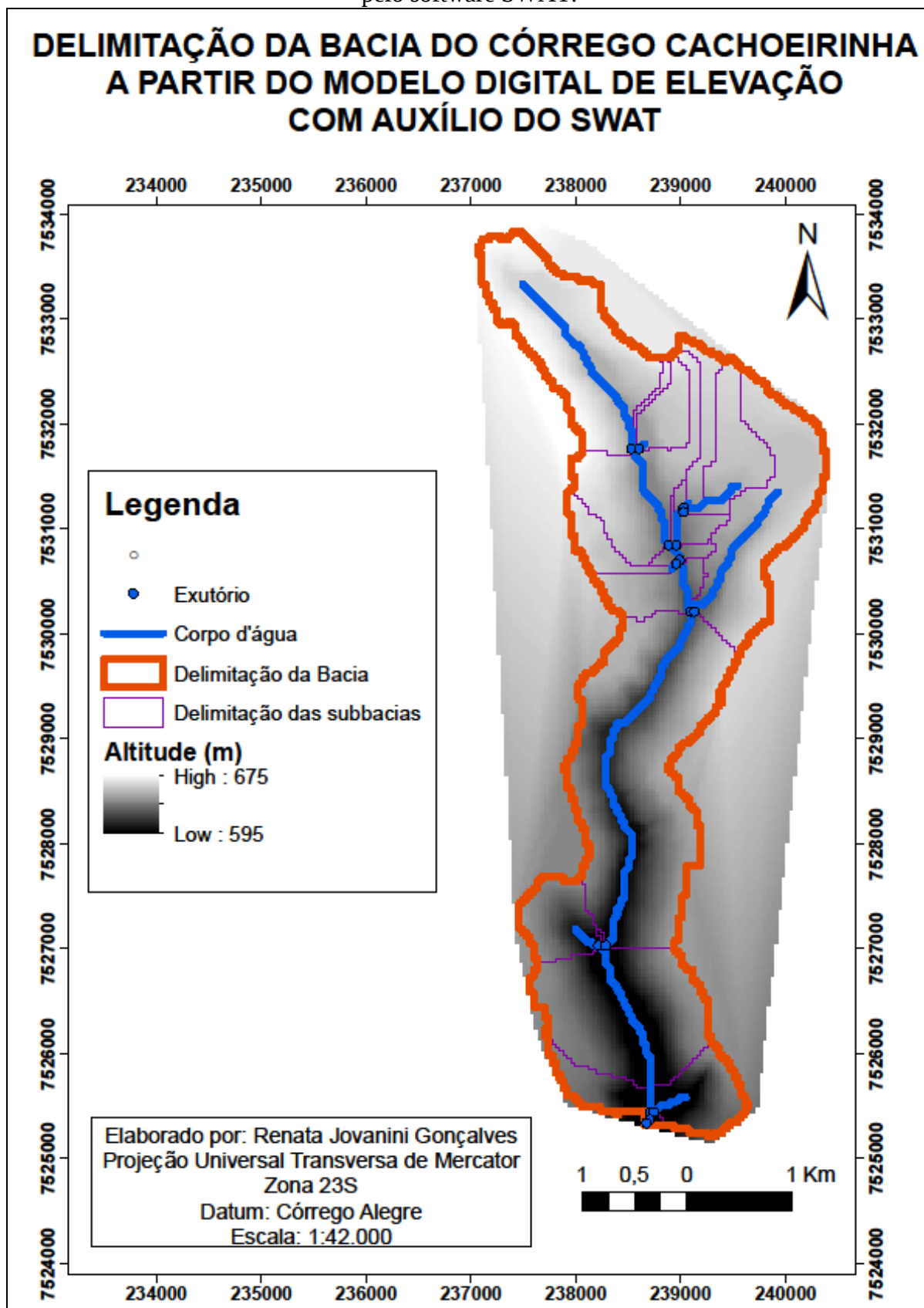
6.2 Avaliação dos parâmetros de relevo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha

Este item pode ser inicialmente analisado através do Modelo Digital de Elevação, no qual é possível observar as diferenças de altitude. Na Figura 7 pode-se observar o MDE ao fundo da delimitação da Bacia, o qual está representado pelo intervalo entre as cores preto e branco, indo de 595 m de altitude a 675 m de altitude, respectivamente.

A análise deste parâmetro deve ser feita em conjunto com a Carta de declividades da Bacia, a qual foi confeccionada por Silva (2008/2009) e está representada na Figura 8.

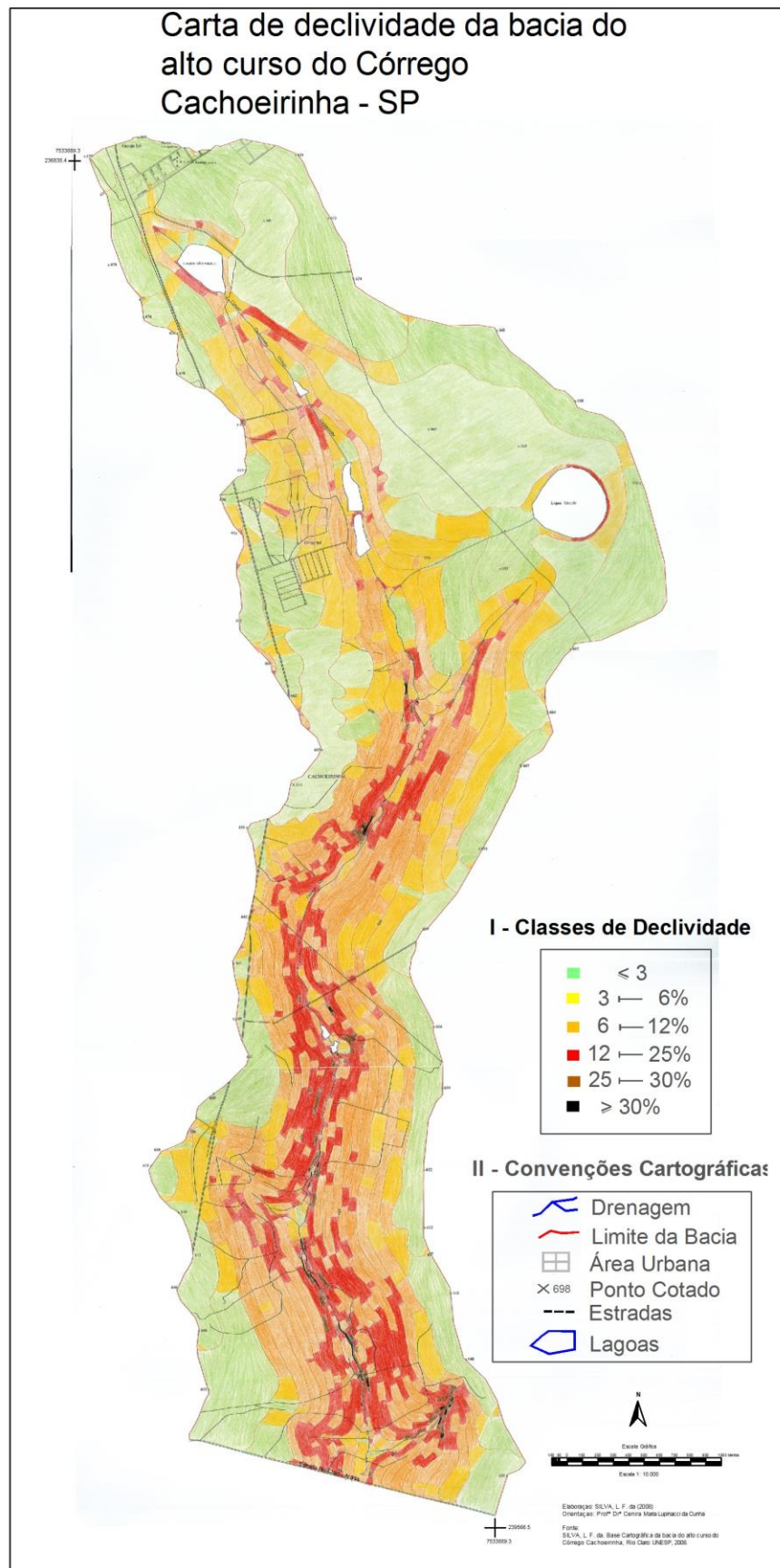
Como mencionado anteriormente, o fator LS (declividade e comprimento da rampa) é determinado automaticamente pelo modelo. O grau do declive tem grande influência sobre a velocidade da enxurrada, acarretando em maior perda de solo.

Figura 7 - Delineamento da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha a partir do MDE, pelo software SWAT.



Fonte: elaborado pela autora através do ArcMap 10.1 (2014).

Figura 8 – Carta de declividade da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.



Fonte: Silva (2008/2009).

6.3 Resultados hidrológicos

O escoamento superficial (SURQ mm) é o saldo das interações da água da bacia no modelo. Suas variações evidenciam o quanto a caracterização física da bacia é essencial para determinar a quantidade de água que escoar sobre a superfície, gerando desagregação e transferência de sedimentos para o canal principal. Se o solo apresenta altos valores de condutividade hidráulica e condições de superfície de solo os quais permitam um fluxo contínuo de água, o resultado esperado é que grande parte do volume precipitado infiltre no solo, resultando em escoamentos superficiais baixos. Da mesma forma, a capacidade de produzir sedimentos depende diretamente deste fator (UZEIKA, 2009).

As saídas dos parâmetros de hidrologia podem ser observados nas Figuras 9 e 10. A Figura 9 mostra dados anuais de todos os parâmetros hidrológicos, dos quais cabe ressaltar:

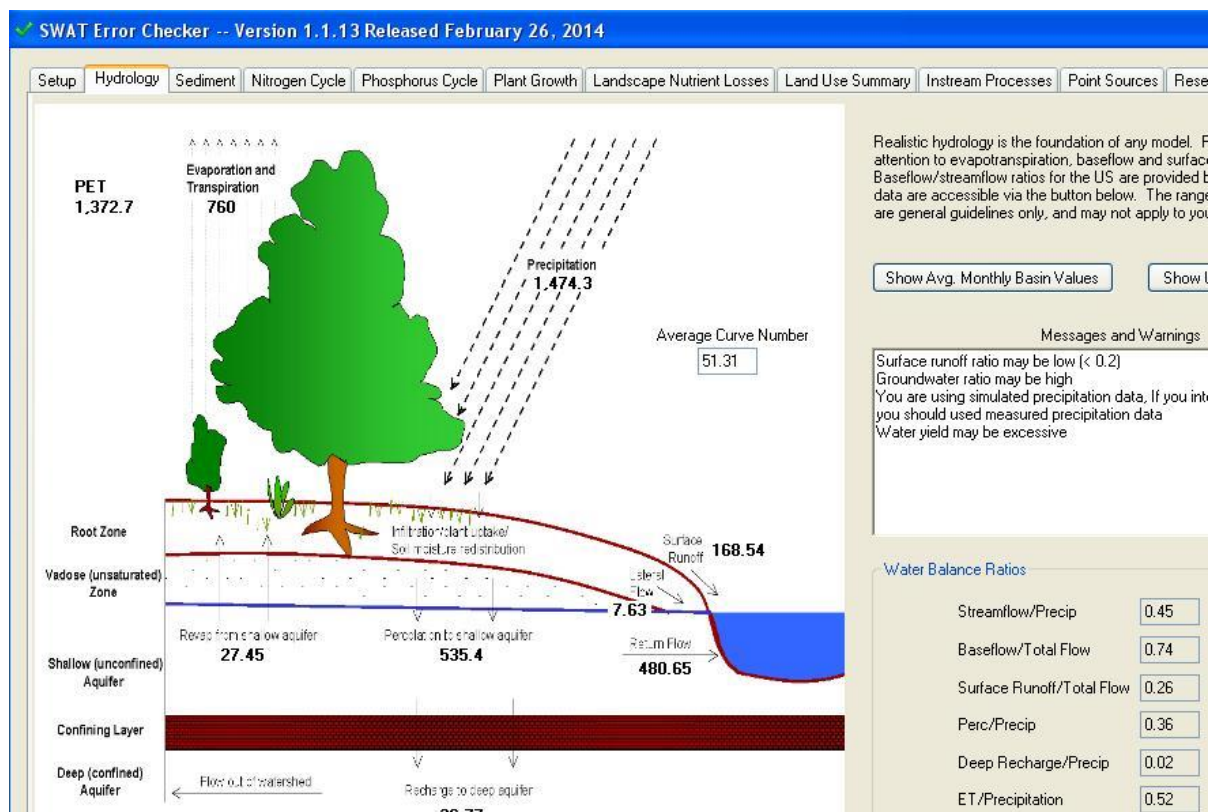
- Precipitação: 1474,3 mm/ano
- Evapotranspiração: 760 mm/ano
- Curva-número média: 51,31
- Evapotranspiração/Precipitação: 0,52 (segundo dados de informação verbal¹, essa relação deve estar entre 0,5 e 0,6 para cidades do Sul ou Sudeste brasileiro);
- Escoamento superficial médio: 168,54 mm/ano.

Na figura 10 pode ser analisado o escoamento superficial (SURQ) por uso, com altos valores para a cana-de-açúcar e baixos valores para mata nativa e silvicultura.

Outro fato importante a ser analisado é a baixa diferença de valores entre mata nativa (101,02 mm) e silvicultura (99,77 mm). Mata nativa é o tipo de uso do solo cuja proteção contra o impacto da gota de chuva é extremamente alto, enquanto que árvores de reflorestamento têm menor eficácia nessa proteção. Portanto, o menor valor de escoamento deveria ser da mata nativa e a diferença para com silvicultura deveria ser maior.

¹ Informação obtida pela autora durante o seu estágio na Embrapa Instrumentação no ano de 2013.

Figura 9 - Parâmetros hidrológicos de saída no modelo SWAT.



Fonte: *printscreen* tirado pela autora durante a análise do SWAT Error Checker, para melhor visualização do layout do software.

Figura 10 - Dados de precipitação anual, escoamento superficial e evapotranspiração por tipo de uso. SUGC: cana de açúcar; AVIC: granja; ORAN: citrus; PINE: silvicultura; FRSE: mata nativa.

LULC	PREC mm	SURQ mm	ET mm
SUGC	1,474.30	265.94	744.38
AVIC	1,474.30	151.82	730.99
ORAN	1,474.30	116.91	811.14
PINE	1,474.30	99.77	680.54
FRSE	1,474.30	101.02	680.42

Fonte: *printscreen* tirado pela autora durante a análise do SWAT Error Checker.

6.4 Resultados de produção de sedimentos

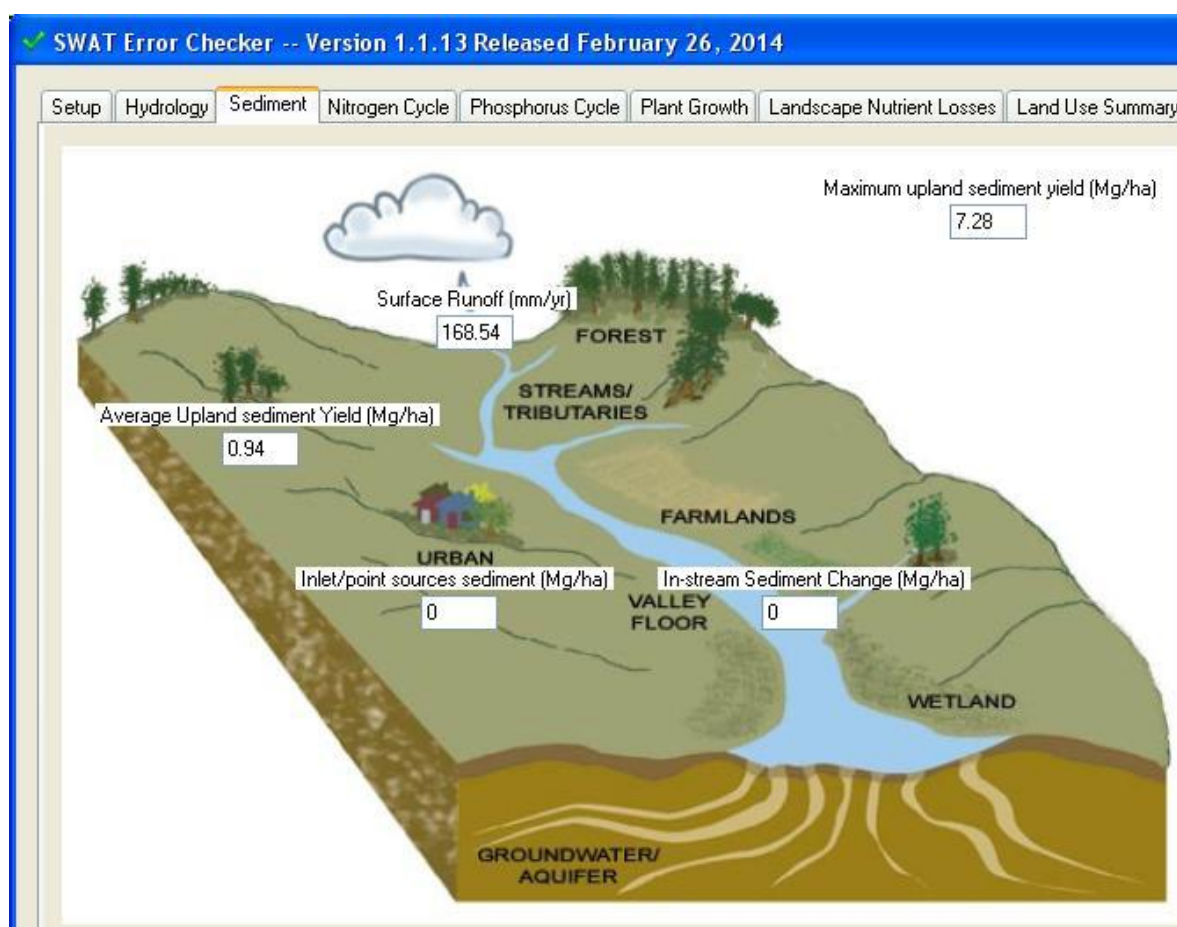
Como já mencionado no trabalho, o SWAT faz uso da MUSLE (ver item 3.3.2) para o cálculo do aporte de sedimentos. Segundo Uzeika (2009), após ter sido realizada a

transferência dos sedimentos gerados nas subbacias, dá-se início à propagação dos mesmo para fora da bacia. O SWAT utiliza o exutório selecionado na simulação como o ponto onde a descarga sólida passa (ver Figura 7 e observar o último exutório sentido Sul, o qual foi selecionado como exutório total). O SWAT aplica a MUSLE em cada uma das suas HRUs geradas e a soma de todas resulta no aporte total da subbacia.

O resultado obtido da média de aporte de sedimentos simulada na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha através do SWAT pode ser observado na Figura 11, cujos valores de importância são:

- Média anual do aporte de sedimentos: 0,94 t/ha/ano ou 94 t/km²/ano;
- Perda anual máxima de sedimentos: 7,28 t/ha/ano ou 728 t/km²/ano.

Figura 11 - Análise de sedimentos feita pelo SWAT..



Fonte: *printscreen* tirado pela autora durante a análise do SWAT Error Checker.

6.5 Comparação dos resultados obtidos com trabalhos anteriormente realizados na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha

Silva (2008/2009) em seu relatório avaliou os processos erosivos da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha através da classificação do Potencial Natural à Erosão (PNE) e da Carta de Estimativa de Perda de Solo da área. O cálculo do Potencial é feito da seguinte maneira: $PNE = LS.K.R$, onde:

- LS = fator topográfico;
- K = erodibilidade do solo;
- R = erosividade das chuvas.

Já a Carta de Estimativa de Perda do Solo inclui o fator uso e ocupação do solo em seu cálculo. Em seu trabalho, Silva (2008/2009) dividiu suas cartas nas seguintes classes, as quais podem ser visualizadas na Figura 12:

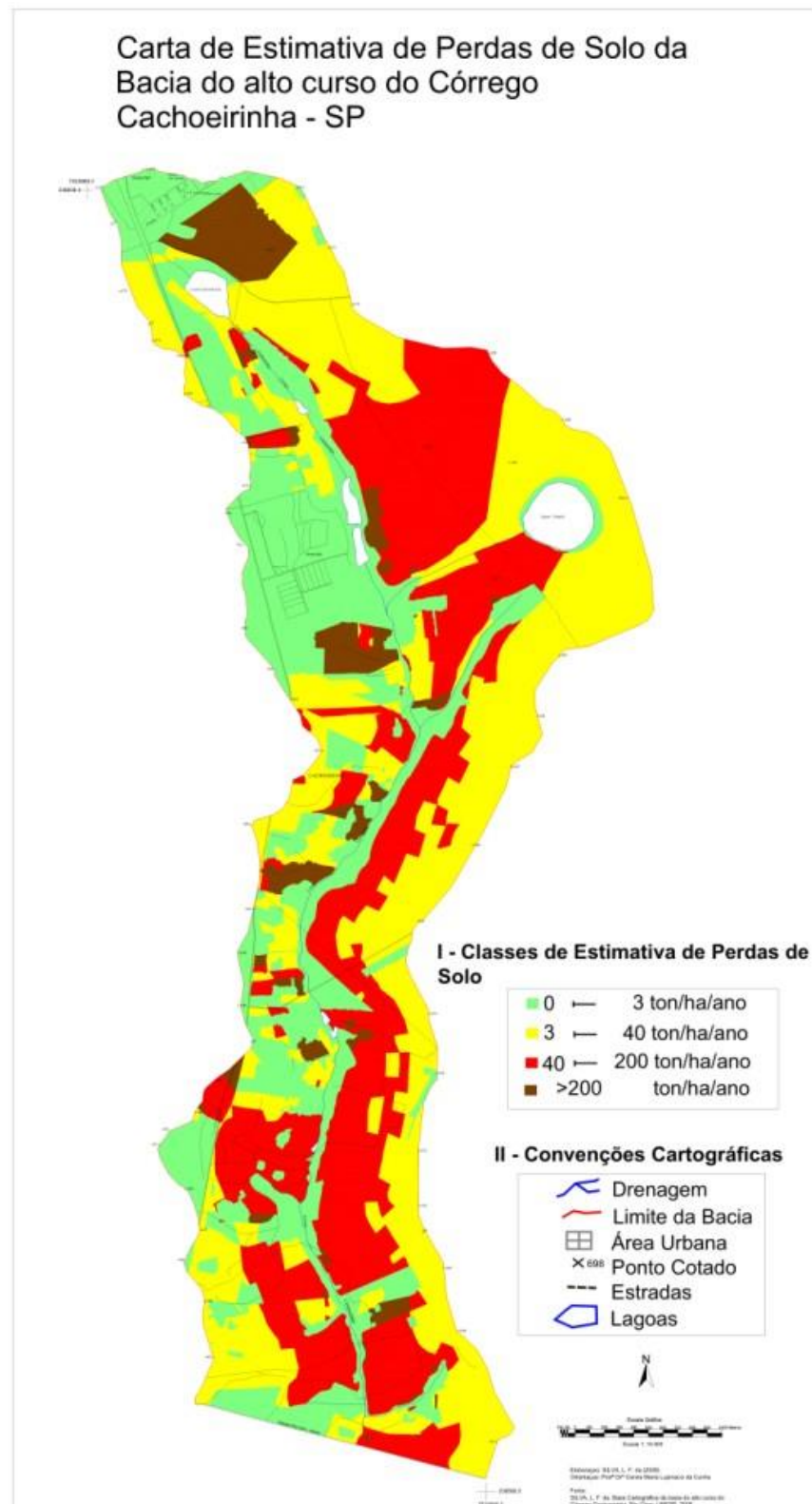
- 0 – 3 t/ha/ano (baixo potencial);
- 3 – 40 t/ha/ano (médio potencial);
- 40 – 200 t/ha/ano (alto potencial) e
- mais que 200 t/ha/ano (muito alto potencial).

A abordagem do trabalho de Silva (2008/2009) foi qualitativa, de modo a representar classes com intervalos de valores de perda de solo na Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha. Já o presente trabalho teve o intuito de quantificar as perdas de solo nesta mesma bacia. Por este motivo, uma comparação efetiva em termos de perda de solo torna-se inviável.

Na Carta apresentada podem existir pontos muito próximos uns dos outros, nos quais exista uma enorme discrepância de valores de perda de solo, enquanto que o presente trabalho apenas obteve o resultado da bacia como um todo em termos de perda de solo.

No entanto, é válida a análise de que as perdas de solo estão associadas com as declividades apresentadas anteriormente e também com o uso e ocupação do solo. Por exemplo, o alto potencial erosivo, destacado em vermelho na Figura 12 pode ser analisado conjuntamente com a Figura 6 observando-se a relação entre as culturas da cana-de-açúcar e do citrus, com as altas taxas de perda de solo (SILVA, 2008/2009).

Figura 12 – Carta de Estimativa de perda do solo da Alta Bacia do Córrego Cachoeirinha.



Fonte: Silva (2008/2009).

Com relação ao trabalho de Bega (2010), a comparação feita foi quantitativa. Em seu trabalho, foi calculada a descarga sólida total em curso de água através do método simplificado de Colby, utilizando ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração medida de sólidos totais, através de equações. Os resultados obtidos foram:

- a) durante os 7 meses do projeto, retornou-se uma vazão total de 1,45 m³/s, enquanto que no presente trabalho a vazão anual é de 0,42 m³/s;
- b) durante os 7 meses do projeto, a perda de solo anual obtida foi de 15,44 ton/ano/km², enquanto que no presente trabalho foram 94 t/km²/ano.

7 CONCLUSÕES

O modelo mostrou-se adequado na simulação dos dados climáticos, referentes aos parâmetros hidrológicos, exibindo resultados satisfatórios e condizentes com a realidade, com relação aos dados médios de precipitação e evapotranspiração, bem como dos resultados de escoamento superficial aliado à análise de uso e ocupação do solo.

Foi observado um elevado escoamento superficial quando se diz respeito à cana-de-açúcar e um baixo escoamento quando fala-se em florestas nativas e/ou projetos de melhoramento de áreas florestais (silvicultura). No entanto, houve

Já com relação à modelagem de sedimentos, comparativamente com estudos complementares, o modelo mostrou-se ineficiente, por algum motivo não evidenciado até o final deste projeto. Alguns motivos sugeridos, que possam ter levado a essa conclusão são: insuficiência dos dados de entrada; segundo Uzeika (2009), o fator LS possui limitações quando aplicado em escala de bacia hidrográfica, não considerando a geomorfologia da bacia.

Por fim, no geral, o modelo SWAT mostra-se uma boa ferramenta para simulação e análise da dinâmica hídrica e sedimentológica de bacias hidrográficas, para fins de gestão adequada dos recursos hídricos e práticas corretas de uso e manejo do solo.

No entanto os projetos devem ser feitos de maneira refinada, bem como devem ser validados e calibrados, para a não distorção dos valores apresentados. Segundo Santos et al (2013), os resultados obtidos pelo SWAT não podem ser adotados como conclusivos quantitativamente e, não devem ser empregados para fins práticos, tendo em vista que a etapa de calibração e validação ainda não foi desempenhada e, portanto, as magnitudes dos valores apresentados podem estar substancialmente distorcidas.

8 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que a construção do banco e dados seja refeita, buscando-se preencher as lacunas deixadas. Nem todos os dados foram obtidos conforme a realidade da área, alguns foram estimados e outros deixados para simulação.

É recomendado também que seja feita a validação e calibração do modelo através de registros observados em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S. L. **Input/Output Documentation: version 2012**. Texas Water Resources Institute TR-439, 2012, 654 p.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. R.; MUTTIAH, S.; WILLIAMS, J. R. **Large area Hydrologic modelling and assessment. Part I: model development**. Journal of the American Water Resources Association. Water Resources Association. v. 34, n. 1. p. 73-89. 1998. Disponível em: <<http://ssl.tamu.edu/>>. Acesso em: 10 out. 2012.

BEGA, V. C. **Avaliação do transporte de sedimentos na Alta bacia do Córrego Cachoeirinha/SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências exatas. Rio Claro. 2010. 53 f.

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

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. New York: Springer, 2008. 626 p.

CEAPLA. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Disponível em: <<http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/>>. Acesso em: 06 out. 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1999. 236 p.

COOPER, M. **Apostila “Erosão do Solo”**. Piracicaba: Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Departamento de Ciência do Solo, 2008.

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro**. Tese de doutorado em Geologia – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. São Paulo: [s.n.], 1983. v. 2.

FERRIGO, S. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC). 2011. 91 f.

GALHARTE, C. A. **Estimativa do escoamento superficial e da produção de sedimentos em áreas de atividades agrossilvopastoris, no Estado de São Paulo, em função da mudança de uso e cobertura do solo**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011. 224 f.

INFO ESCOLA: Navegando e Aprendendo. Disponível em <<http://www.infoescola.com/geografia/ciclo-hidrologico-ciclo-da-agua/>>. Acesso em 10 jun. 2014.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.

MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. **Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 727-733, ago. 2003. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000400017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 08 abr. 2014.

MINOTI, R. T. **Abordagens qualitativa e quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. 247 f.

PEREIRA, L. H. **Caracterização da erosão hídrica laminar do solo em uma bacia hidrográfica com base na malha fundiária, por meio de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem**. Dissertação (Mestrado para obtenção do título de Mestre em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro. 2010. 117 f.

SANTOS, R. O.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C. L. N.; RIGHETTO, A. M. **Avaliação da Produção e Aporte de Sedimentos para o Rio Potengi, RN**. Rev. Bras. de Rec. Hídricos – RBRH, v. 18, n. 3, p. 149-163, jul./set. 2013. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/115d20186b0d9785855ecbde585ab945_a5a9af05ef0154af16860be93833e916.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2014.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrologica do solo para a determinação do excesso de chuva do metodo do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. Dissertação (Mestrado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2004. 189 f..

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação**. Rev. Bras. de Rec. Hídricos – RBRH, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005a.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 2: Aplicação**. Rev. Bras. de Rec. Hídricos – RBRH, v. 10, n. 4, p. 19-29, out./dez. 2005b.

SILVA, L. F. da. **A quantificação da erosão pluvial na Bacia do Alto Curso do Córrego Cachoeirinha – Rio Claro (SP)**. Relatório final de iniciação científica vinculado ao PIBIC/CNPq – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP Rio Claro – SP. Rio Claro. 2008/2009. 51 p.

SPERLING, M. V. **Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias: estudos e modelagem da qualidade da água dos rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 588p. v. 7.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

UZEIKA, T. **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. – UFRGS. Porto Alegre. 2009. 144p.

VILLELA, S. M. **Hidrologia aplicada**. Colaboração de Arthur Mattos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1979.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. **Arcswat Interface For Swat 2012: User's Guide**. Texas: Blackland Research and Extension Center (Texas Agrilife Research) and Grassland, Soil And Water Research Laboratory (Usda Agricultural Research Service), 2013, 459 p.

ZAINE, M. F.; PERINOTTO, J. A. J. **Patrimônios Naturais e História Geológica da Região de Rio Claro: edição histórica 150 anos da Câmara Municipal de Rio Claro, SP**. Câmara Municipal: Arquivo Público e Histórico. Rio Claro. 1996. 91 p.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)**. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro (SP). 2000. 188 f.