

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Energia

Fernanda Giffoni Fernandes Luz

Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP.

Dezembro de 2012
Itajubá - MG,

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Energia

Fernanda Giffoni Fernandes Luz

Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP.

Dissertação submetida ao programa de Mestrado em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antônio Dupas

Dezembro de 2012
Itajubá - MG,

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá
Bibliotecária Jacqueline Balducci – CRB_6/1698

L979a

Luz, Fernanda Giffoni Fernandes.

Avaliação do Potencial de utilização dos dados da SRTM-Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP./Fernanda Giffoni Fernandes Luz. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.
88 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antônio Dupas.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Bacias hidrográficas. 2. Perda de solo. 3.EUPS. 4.SRTM
5. Índice Kappa. 6. Avaliação de acurácia 7. Planejamento territorial. I. Dupas, Francisco Antônio, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

*À minha mãe e ao meu pai.
Pelo apoio incondicional.*

O caminho, algumas vezes, me conduziu a além dos limites do confortável e do seguro. Nestes momentos, tive vontade de desistir, no entanto existiram pessoas dispostas a segurar em minhas mãos e dizer:

– Não desista, vamos juntos!

Quando senti que podia contar com a força, o apoio e o carinho das pessoas que estão comigo, o caminhar se tornou mais leve e tranquilo e, então, foi possível prosseguir.

Obrigada minha mãe *Mariângela Fernandes* e meu pai *José Abel Royo dos Santos*, a base que vocês me oferecem sustenta todas as pontes para atravessar todos os obstáculos.

Obrigada pela disponibilidade, confiança e amizade, *Professor Antônio Francisco Dupas*, teu suporte é imprescindível.

Gratidão, *Júlio César de Souza Matos*, por estar ali, sempre e por ter escolhido trilhar o caminho ao meu lado. Tua cumplicidade é extremamente importante.

Agradeço minha avó, *Dona Maria Luzia Fernandes* e minha tia, *Maria Regina Fernandes* pelo abrigo de nossa casa e pelos braços sempre abertos em qualquer situação.

Sou grata ainda aos meus amigos todos, pela amizade e refúgio garantido nos momentos de dificuldade de todos os tipos. Gratidão em especial a *Samara Pineschi* e a *Denício Coelho*, pela paciência e dedicação ao me ajudar com as matérias mais difíceis.

Gratidão especial à amiga *Camila Abe*, por todas as horas juntas e indispensável contribuição para que esta pesquisa pudesse ser desenvolvida.

Gratidão também às sempre importantes contribuições dos colegas *Fernanda Paes*, *Carlos Wilmer Costa* e *Rogério Coli da Cunha* desde o começo de meu caminho acadêmico.

*Pessoas simples, em lugares pontuais,
fazendo coisas pequenas, mudarão o mundo*

Provérbio Africano

Sumário

Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	6
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	6
Resumo	8
Abstract.....	9
Capítulo I - Introdução	9
1.1.Introdução e Justificativa.....	10
1.2.Objetivos.....	11
Capítulo II - Revisão Bibliográfica	12
2.1. Processos erosivos e suas implicações	12
2.2. Técnicas de conservação	17
2.3. Equação Universal de Perda de Solos	22
2.4. Modelo Digital do Terreno proveniente da SRTM - <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>	24
2.5. Integração da equação universal de perda de solo e sistemas de informações geográficas.....	27
2.6. Índice Kappa.....	29
2.7. Trabalhos anteriores relevantes realizados na área de estudo	30
Capítulo III - Materiais e Métodos	36
3.1. Materiais	36
3.2. Área de Estudo	37
3.3. Métodos	40
(1) Fatores da Equação Universal de Perda de Solo	42
(2) Operações	45
(3) Matriz de erro e Índice Kappa	46
(4) Influência de cada classe dos fatores sobre os valores encontrados para estimativa de perda de solo.....	47
(5) Análise dos valores de Kappa.....	47
Capítulo IV - Resultados Obtidos e Análises	49
Capítulo V - Conclusões.....	72
5.1. Recomendações	74
Referências Bibliográficas.....	76
ANEXO I	83

Lista de Figuras

Figura 1 - Processos erosivos (Fonte: adaptado de Teixeira et al., 2000).	13
Figura 2 - Erosão laminar, linear e voçoroca (Fonte: Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999).	14
Figura 3 - Exemplo de represa assoreada por uso inadequado. (Fonte: Weill e Sparovek, 2008).	16
Figura 4 - Importância da aplicação de técnicas conservacionistas (Fonte: CEPLAC, 2010).	18
Figura 5 - Exemplo de mata ciliar protegendo o curso d'água (Fonte: REIS e ROGALSKI, 2006).	20
Figura 6 - Exemplo de solo exposto por uso inadequado (Fonte: Avanzi, 2010).	19
Figura 7 - Mapa de Perda de solo da bacia do Rio Grande, MG (Fonte: Beskow, 2009).	23
Figura 8 - Exemplo de Modelo Digital do Terreno. Área alagada a montante da Represa da UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa) (Fonte: Tundisi e Matsumura, 2010).	25
Figura 9 - Esquema demonstrativo da plataforma espacial de imageamento que gerou os dados da SRTM (Fonte: www.altamontanha.com/srtm , capturado em 16/06/2012).	26
Figura 10 - Zoneamento da vulnerabilidade ambiental no manancial do Ribeirão do Feijão (Fonte: Cunha et al., 2011).	31
Figura 11 - Condições de predisposição e de poluição de águas subterrâneas no manancial do Ribeirão do Feijão (Fonte: adaptado de Zuquette, Palma e Pejon, 2009).	32
Figura 12 - Imagens comparadas no trabalho de Rodrigues, 2009.	34
Figura 13 - Localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e no Brasil e da sub-bacia do manancial do Ribeirão do Feijão nos municípios de São Carlos, Analândia e Itirapina, drenagens, municípios do entorno e a mancha urbana da cidade de São Carlos (Fonte: adaptado de Costa et al., 2012).	37
Figura 14 - Seção geológica da região de São Carlos. (Fonte: Costa et al., 2012, adaptado de Zuquette, 1981).	39
Figura 15 - Esquema simplificado dos procedimentos metodológicos.	41
Figura 16 - Mapa Pedológico (Fonte: Carta Pedológica, SF-23-Y-A-I, 1:100.000, Oliveira e Prado, 1984).	50
Figura 17 - Fator LS, adimensional, A - SRTM e B - carta topográfica/referência 1:50.000.	52
Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2006 e cada um dos temas identificados de 1 até 8 na ampliação (Fonte: Cunha et al., 2011).	55
Figura 19 - Potencial Natural de Erosão em ton/ha/ano. A - PNE/referência; B - PNE/SRTM.	57
Figura 20 - Estimativa de Perda de solo em ton/ha/ano. A - EPS/referência; B - EPS/SRTM.	58
Figura 21 - Áreas ampliadas de cada mapa para os dados do MDT/referência 1:50.000.	60
Figura 22 - Áreas ampliadas de cada mapa para os dados do MDT/SRTM.	61
Figura 23 - Gráfico da relação entre o mapa pedológico e EPS/referência e EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.	64
Figura 24 - Gráfico da relação entre as classes do mapa do fator LS/referência e LS/SRTM com EPS/referência e EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.	65
Figura 25 - Gráfico da relação entre os tipos de uso e os mapas EPS/referência e EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.	66
Figura 26 - Mapas hipsométricos, A - referência; B - SRTM.	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados de entrada.	36
Tabela 2 - Aplicativos.....	36
Tabela 3 - Classes interpretativas de erosividade da chuva.....	43
Tabela 4 - Classes interpretativas de erodibilidade dos solos.	43
Tabela 5 - Classes interpretativas do fator LS.....	44
Tabela 6 - Classes interpretativas de potencial natural de erosão.	45
Tabela 7 - Classes interpretativas de perda de solo.....	46
Tabela 8 - Classes interpretativas do índice Kappa.....	47
Tabela 9 - Valores médios de K para os 8 tipos de solo da bacia.	51
Tabela 10 - Fator C para as diferentes coberturas do solo.....	54
Tabela 11 - Síntese dos resultados para PNE.	58
Tabela 12 - Síntese dos resultados para EPS.....	59
Tabela 13 - Valores encontrados para os fatores da EUPS e seus resultados para os 8 pontos destacados nas ampliações.....	62
Tabela 14 - Matriz de erro para o mapas hipsométrico/referência e hipsométrico/SRTM.	67
Tabela 15 - Matriz de erro para os mapas LS/referência e LS/SRTM.	69
Tabela 16 - Matriz de erro para os mapas de PNE/referência e PNE/SRTM.....	70
Tabela 17 - Matriz de erro para os mapas EPS/referência e EPS/SRTM.....	70

Lista de Siglas e Abreviaturas

DEM - *Digital Elevation Model*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agropecuária

EPS - Estimativa de Perda de Solo

EUPS - Equação Universal de Perda de Solo

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

GPS - *Global Positioning System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MDT - Modelo Digital do Terreno

MNT - Modelo Numérico do Terreno

NASA - *National Imagery and Mapping Agency*

NEPA - Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática

NIMA - Agência Espacial Italiana

PNE - Potencial Natural de Erosão

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

LUZ, FERNANDA GIFFONI FERNANDES. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

Resumo

Dados topográficos, corrigidos de todo Brasil, são disponibilizados pela Embrapa. Provenientes da SRTM, esses dados são gratuitos e constituem um recurso poderoso para o planejamento territorial e ambiental do país. Porém, sua utilização na aplicação de modelos em sistemas de informação deve ser avaliada para verificar o grau de confiabilidade da informação. Foi escolhida a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, manancial de abastecimento do município de São Carlos, SP, localizada a montante de importantes usinas hidrelétricas da bacia do Rio Tietê, para serem estimadas as taxas de perda de solo da bacia. Para tanto, foi aplicado o modelo EUPS - Equação Universal de Perda de Solo, sendo possível identificar o fator que exerce maior influência nas grandes perdas de solo e avaliar o desempenho da aplicação do modelo digital do terreno proveniente da SRTM. Como referência foi utilizada a carta topográfica do IBGE em escala 1:50.000. A acurácia foi avaliada por meio da aplicação do índice Kappa que, através de uma matriz de erro, mostra o grau de semelhança entre os mapas. O índice Kappa revelou que o MDT/SRTM possui nível de precisão considerado razoável (0.6594), enquanto que os valores de Kappa para o fator LS (0.2584), o potencial natural de erosão (0.2582) e a perda de solo (0.4199) apresentam níveis de acurácia considerados baixo, e baixo e moderado, respectivamente. O trabalho mostrou que a aplicação do MDT/SRTM pode oferecer resultados razoavelmente satisfatórios em bacias hidrográficas onde o fator LS não é determinante na perda de solo. Os resultados apontam para a cobertura do solo como sendo o fator de maior influência nos valores de perda de solo da bacia e, o solo exposto como sendo o maior causador das grandes perdas, sobretudo quando ocorrem sobre os solos podzólicos e as areias quartzosas. Conclui-se ainda que, para ser garantida a conservação, a qualidade das águas do manancial de abastecimento do município e também a minimização do transporte de solos para os reservatórios que produzem energia hidrelétrica a jusante da bacia, é essencial a utilização de técnicas de planejamento e políticas adequadas de uso do solo.

Palavras-chave: bacias hidrográficas, perda de solo, EUPS, SRTM, índice Kappa, avaliação de acurácia, planejamento territorial.

LUZ, FERNANDA GIFFONI FERNANDES. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM- Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

Abstract

Throughout Brazil refined topographic data are supplied by Embrapa. From SRTM, these data are free and are a powerful resource for the territorial and environmental planning in the country. However, its use in models for information systems must be evaluated in order to verify the reliability degree of the information. The studied watershed is Ribeirão do Feijão, water supply source of the city of São Carlos, SP, located upstream of important hydroelectric plants of the Tietê River basin. In order to estimate soil loss rates, the USLE model - Universal Soil Loss Equation was applied. Therewith it was possible to identify the factor that exerts the greatest influence in large losses of soil and assess the performance of digital elevation model from the SRTM application. As reference it was used the topographical map from IBGE in scale 1:50,000. The accuracy was assessed using the Kappa index which, through a matrix of error, shows the degree of similarity between the maps. The Kappa index revealed that MDT/SRTM has an accuracy level considered reasonable (0.6594), while Kappa values for factor LS (0.2584), natural erosion potential (0.2582) and soil loss (0.4199) accuracy levels are considered low, low and moderate, respectively. The study showed that the application of MDT/SRTM can offer fairly satisfactory results in river basins where the LS is not a decisive factor in soil loss. The results point to soil coverage as being the factor that induces to the greatest soil losses values. Exposed soil was the greatest cause of the highest losses, particularly when they occur on podzolic soil and quartz sands. Yet it was concluded that to ensure the conservation of water quality and also to minimize the transport of soil to hydroelectric reservoirs downstream of basin is essential to plan space occupation with appropriate land use policies.

Keywords: water basin, soil loss, USLE, SRTM, Kappa index, accuracy assessment, spatial planning.

Capítulo I - Introdução

1.1. Introdução e justificativa

A capacidade humana de transformação dos recursos naturais do planeta Terra é de tamanha magnitude que pode ser prejudicial para o próprio ser humano. A devastação de ambientes naturais pelo homem é reflexo da falta de interação com a Natureza, pois se utilizássemos os espaços de maneira a aproveitar melhor os recursos naturais, poderíamos ter menos trabalho e viver em maior harmonia com o planeta que habitamos. Os recursos naturais estão disponíveis e devem ser manejados de forma a não se tornarem inutilizáveis.

Muitas são as formas de degradação dos recursos naturais, como a supressão das vegetações naturais, a contaminação das águas ou a poluição dos ares. No entanto, a erosão é um dos maiores e mais visíveis tipos de degradação ambiental, com influência na capacidade de produção de alimentos, assoreamento e poluição de rios e reservatórios destinados tanto ao abastecimento da população como à produção de energia elétrica (Palm et al., 2007). Os processos erosivos, iniciados pela ação da água, podem ser acelerados pela utilização de práticas inadequadas de manejo do solo. Métodos que admitem o solo exposto durante parte do ciclo de cultivo causam o esgotamento de terras férteis e produtivas.

“No Brasil, um dos fatores de desgaste que mais seriamente tem contribuído para a improdutividade do solo é, sem dúvida, a erosão hídrica, facilitada e acelerada pelo homem com suas práticas inadequadas de agricultura. Práticas agrícolas comprovadamente nefastas, ainda adotadas pelos agricultores, como plantio continuado e mal distribuído de culturas esgotantes e pouco protetoras do solo, o plantio em linhas dirigidas a favor das águas, a queimada drástica dos restos culturais e o pastoreio excessivo, estão acelerando gravemente o depauperamento das melhores terras do país.” (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

Como efeito imediato dos sedimentos que são conduzidos aos corpos d’água, destaca-se o assoreamento e contaminação dos corpos d’água a jusante, com a consequente redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios destinados à produção de energia elétrica e o empobrecimento dos solos. A bacia do Ribeirão do Feijão encontra-se na

cabeceira da bacia do Rio Tietê, portanto, a montante de diversos reservatórios destinados à produção de energia elétrica e abastecimento urbano. É de extrema urgência que as áreas que cobrem as bacias com reservatórios permaneçam protegidas, pois, a transferência de sedimentos para dentro dos reservatórios os assoreia e, com o tempo, os torna inutilizáveis.

O planejamento consciente de bacias hidrográficas pode ser uma solução permanente para os problemas causados pela ocupação desordenada do espaço pelo homem. A ocupação planejada deve levar em consideração as características naturais e sociais da bacia hidrográfica e, com isso, escolher as melhores atividades para cada localização. Por exemplo, as bacias localizadas a montante de reservatórios devem ser apropriadas de tal forma que o carreamento de sedimentos não ocorra excessivamente, visto que isso prejudica a qualidade da água e o tempo de vida dos reservatórios.

Diante da necessidade de planejamento da ocupação do espaço, a disponibilidade de dados é de suma importância para que os estudos possam ser realizados apropriadamente. Atualmente, o aumento da oferta de dados referentes à configuração geográfica do espaço oferece uma nova oportunidade para a aplicação de vários tipos de modelos ambientais, através dos quais é possível experimentar diversas possibilidades de ocupação e recomendar uma ocupação adequada às diversas realidades das diferentes bacias hidrográficas.

Dentre os novos dados disponíveis está o Modelo Digital do Terreno proveniente da *Shuttle Radar Topography Mission* - MDT/SRTM, que gerou dados numéricos de relevo e topografia de regiões em todo o globo. Porém, alguns autores (Di Luzio et al., 2005; Hancock et al., 2006; Vente et al., 2009; Lin et al., 2012) destacam que é preciso precaução para a escolha e utilização dos dados disponíveis. Deste modo, este trabalho se justifica pela necessidade de avaliação da acurácia dos dados disponíveis para aplicação em modelos de planejamento territorial, bem como pelo fato de ser importante se conhecer os principais fatores que atuam na degradação dos solos e suas interferências sobre a área estudada.

Ainda, esta pesquisa está vinculada ao projeto de Políticas Públicas intitulado “Uso atual e potencial do solo no município de São Carlos, SP - base do planejamento urbano e regional”, processo nº 98/10924-3 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). No Anexo 1, além de outros trabalhos de apoio ao tema em outras regiões, é mostrada a estrutura dos trabalhos desenvolvidos e em desenvolvimento relacionados ao tema planejamento de bacias hidrográficas dentro do manancial do Ribeirão do Feijão (São Carlos, SP).

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral realizar uma avaliação da acurácia dos dados da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* por meio da estimativa e análise das perdas de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, manancial de abastecimento urbano de São Carlos, São Paulo.

Para atender ao objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Elaborar uma revisão bibliográfica atualizada sobre o tema estudado;
- Determinar os dados necessários para a estimativa de perda de solo da área de estudo através da Equação Universal de Perda de Solo - EUPS;
- Aplicar a EUPS utilizando o MDT/SRTM e a carta topográfica em escala 1:50.000 como dados de entrada para o fator topografia;
- Analisar as implicações de cada classe dos fatores da EUPS sobre os valores estimados de perda de solo e, com isso, identificar as classes de maior influência nos altos valores de perda para a referida bacia hidrográfica;
- Analisar a estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do manancial.
- Avaliar a acurácia do Modelo Digital do Terreno fornecido pela SRTM - MDT/SRTM através de matriz de erro e índice Kappa, utilizando a carta topográfica como referência.

Capítulo II - Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão da literatura para os principais temas abordados nesta pesquisa. Procurou-se tratar dos processos erosivos e das principais implicações ambientais geradas pelo aceleramento destes nos terrenos, assim como a importância das técnicas de conservação para a diminuição da erosão. Foram considerados ainda itens sobre a equação universal de perda de solo e suas aplicações em sistemas de informações geográficas. A revisão também incidiu sobre Modelos Digitais do Terreno e a SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*, bem como sobre a utilização do índice Kappa em comparações com a matriz de erro. Finalmente, foi feito um levantamento sobre trabalhos anteriores realizados na área de estudo.

2.1. Processos erosivos e suas implicações

O termo erosão vem do verbo em latim *erodere* que significa escavar (Zachar, 1982 apud Silva et al., 2004). Atualmente, erosão pode ser entendida como o processo de desagregação, transporte e arraste de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rochas, através da ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e/ou organismos (plantas e animais). A erosão ainda pode ser destacada como a principal causa de degradação do solo quando acelerada pela ação do homem (Bitar, 1995; Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Baban e Yusof, 2001; Araujo et al., 2005).

Quando abordado sob o aspecto geológico ou natural, o processo erosivo é responsável pela esculturação do relevo sobre a crosta terrestre, sendo um processo de longa duração que ocorre de forma gradual e lenta, em equilíbrio com a formação do solo. É possível verificar uma sequência de fases do processo erosivo a partir da dissecação e aplainamento vertical da paisagem (Silva et al., 2004). Porém, um desequilíbrio com o processo de pedogênese natural é desencadeado quando a erosão é acelerada pela ação antrópica (Bitar, 1995; Gomes, 2006; Mello et al., 2007). As taxas de erosão encontradas em agrossistemas tropicais são geralmente muito mais altas do que as taxas de formação dos

solos. Se a taxa de retirada ultrapassa a taxa de formação do solo, o sistema de produção utilizado para agricultura não pode ser definido como sustentável, já que o solo é um recurso natural sem substituto e uma vez perdido, não pode ser repostado.

A erosão dos solos é um dos problemas ambientais mais sérios em todo mundo (Jain e Kothyar, 2000; Palm et al. 2007), pois consiste em um fenômeno extremamente complexo, resultante da interação de inúmeros fatores. Os processos erosivos compreendem três fases: desagregação, transporte e deposição de sedimentos. Durante a ocorrência destas três fases, a erosão muda a vida e a quantidade de matéria orgânica presentes no solo, além de transformar a disposição dos primeiros horizontes, alterar o nível de ph e modificar a densidade. A erosão ainda diminui a profundidade do solo, a quantidade de nutrientes e a qualidade dos recursos hídricos, comprometendo as propriedades de todo o ecossistema (Palm et al., 2007) (Figura 1). Desta forma, a camada fértil do solo acaba sendo exaurida em curto período de tempo (Sparovek e Schnug, 2001).

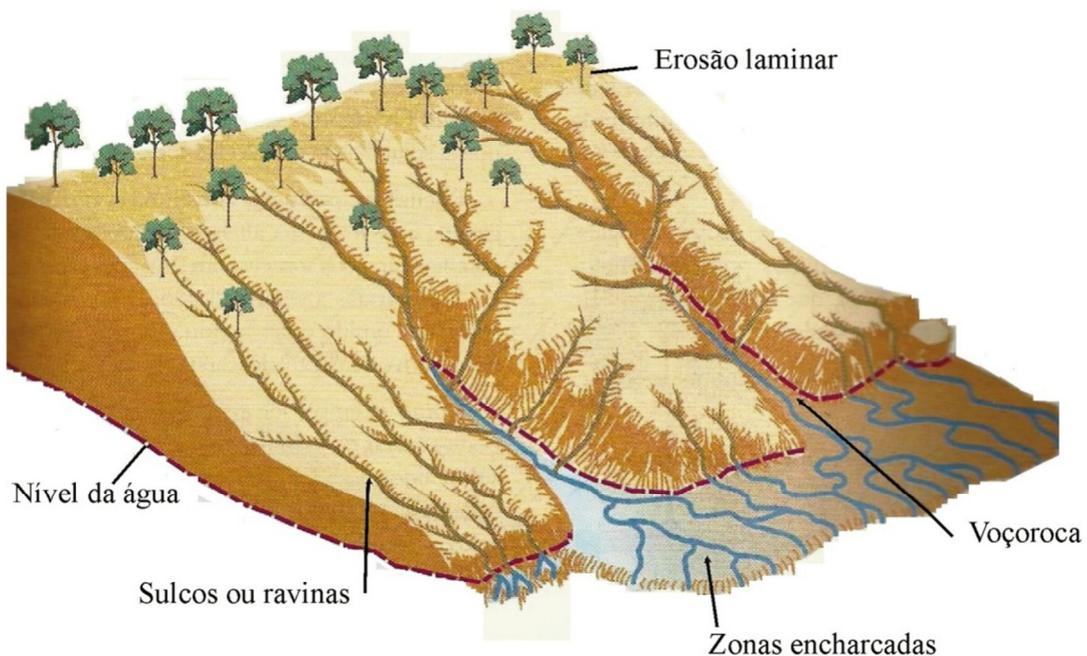


Figura 1 - Processos erosivos (Fonte: adaptado de Teixeira et al., 2000).

A erosão ocorrida pela ação da água, tipo mais comum em ambientes tropicais, pode ocorrer de três maneiras: laminar, por sulcos e por voçorocas (Figura 2). A erosão laminar acontece em função do escoamento superficial difuso da água, com conseqüente carreamento de sedimentos do solo sobre os terrenos descobertos ou com cobertura insuficiente. A chuva, primeiramente, arrasta as partículas mais leves e finas e com elas



Figura 2 - Erosão laminar, sulcos e voçoroca (Fonte: Proin/Capes e Unesp/IGCE, 1999).

a parcela que contém maior quantidade de nutrientes. Em culturas perenes, nota-se, em alguns anos, a exposição das raízes. Esta é a forma menos perceptível de erosão, porém a mais perigosa, pois implica na remoção de grandes quantidades de sedimento sendo difícil de ser identificada pelos produtores rurais.

A erosão linear se dá em sulcos quando há concentração de água em linhas de fluxo. Nas fases iniciais, os sulcos podem ser desfeitos com operações de controle de velocidade da água, porém, em estágios avançados podem se converter em voçorocas, com profundidade e largura em constante crescimento (adaptado de Bitar, 1995; Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Ferreira, 2005).

Os processos erosivos estão sempre relacionados entre si e muitos deles acontecem pela introdução de novas culturas e novos métodos de cultivo. Apesar de sua juventude e do tamanho de seu território, o Brasil já apresenta comprovações evidentes da gravidade do problema de depauperamento de suas terras. Cerca de 500 milhões de toneladas de terra são perdidas anualmente pelo efeito da erosão (dados de 1999), e o estado de São Paulo responde por cerca de 25% da perda nacional, decorrente do uso intensivo ou indevido de suas terras (Bertoni e Lombardi Neto, 1999). Os processos do solo são parte de um sistema ambiental que é todo interligado, desta maneira, entender os fatores que afetam a estabilidade e a resistência dos solos, frente aos impactos erosivos, é fundamental para a ciência dos solos (Palm et al., 2007). Alguns estados brasileiros, como SP, já possuem serviços especializados de assistência técnica ao agricultor que geram trabalhos sobre o levantamento das condições dos locais e a execução das práticas conservacionistas necessárias (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

Diversos são os fatores que contribuem para o aumento ou diminuição das taxas de erosão, dentre eles destaca-se: (i) a chuva como o fator climático de maior importância, pois a água desagrega as partículas de solo através do impacto e as transporta durante o escoamento superficial difuso ou ao longo das linhas de fluxo; (ii) a infiltração que depende da porosidade, da umidade, do grau de agregação das partículas e da composição do solo. Quanto maior a velocidade de infiltração, menor a intensidade de enxurrada na superfície e, conseqüentemente, menor a erosão; (iii) a topografia, representada pela declividade e pelo comprimento de rampa que determinam a velocidade do escoamento superficial; (iv) a natureza do solo, as diferentes propriedades de cada solo como estrutura, textura, permeabilidade, densidade, características químicas e biológicas e quantidade de matéria

orgânica exercem diferentes influências sobre o processo de erosão ao conferir maior ou menor resistência à força das águas; (v) a cobertura vegetal, pois constitui a defesa natural de um terreno contra a erosão, protegendo contra o impacto das gotas, aumentando a infiltração da água pela ação das raízes, aumentando a quantidade de matéria orgânica que, por sua vez, melhora a capacidade de retenção de água e diminui a velocidade do escoamento pelo aumento do atrito com a superfície (adaptado de Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

Como impactos negativos gerados pela ação da erosão são importantes pontos a ressaltar: (i) a redução da capacidade dos córregos e reservatórios, pois a sedimentação causa perda da capacidade de armazenamento (Figura 3); (ii) o aumento dos custos das fontes de suprimento de água, uma vez que a contaminação pela sedimentação eleva os custos de tratamento de água; (iii) a ocorrência de danos para fauna silvestre e aquática, devido ao prejuízo no balanço de oxigênio dissolvido nas águas, pois os sedimentos obscurecem a luz necessária ao crescimento das espécies aquáticas nos lagos e reservatórios; (iv) o acréscimo nos custos de manutenção dos canais e rios navegáveis, pois a dragagem é elevada para conservar os leitos navegáveis; (v) a diminuição do potencial de geração de energia, já que os reservatórios com altas taxas de sedimentação têm a capacidade comprometida, resultando na diminuição do potencial energético e redução de sua vida útil;



Figura 3 - Exemplo de represa assoreada por uso inadequado. (Fonte: Weill e Sparovek, 2008).

(vi) o comprometimento dos sistemas de irrigação e drenagem, uma vez que a sedimentação diminui a capacidade dos sistemas de irrigação, e o material erodido é depositado, dificultando a drenagem, com redução da fertilidade das terras e conseqüente diminuição da produção; (vii) o incremento dos custos de caminhos e estradas, pois, após grandes chuvas, estradas e caminhos são bloqueados por sedimentos; (viii) a erosão diminui a profundidade do solo, uma vez que remove a camada de matéria orgânica e, com isso, a quantidade de nutrientes disponíveis aumentando os custos com adubação; (ix) diminuição da capacidade de infiltração do solo, o que aumenta o volume do escoamento superficial, gerando mais erosão; (x) a diminuição do valor comercial das terras, uma vez que a produtividade é comprometida, já que os solos que perderam a camada superficial são difíceis de preparar por exigirem mais força de tração dos equipamentos e são mais fracos e pobres em nutrientes, além dos sulcos e voçorocas impedirem a circulação das máquinas; (xi) a contaminação dos recursos hídricos a jusante dos lugares erodidos, pois junto com os sedimentos, os excessos de fertilizantes e venenos usados na agricultura também atingem os cursos d'água (adaptado de Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Palm et al., 2007). Por isso, a questão da erosão deve ser enfrentada por todos os setores da sociedade, já que a diminuição da capacidade de produzir alimentos, o comprometimento da geração de energia elétrica e a degradação da qualidade das águas são problemas que atingem todos os que dependem desses serviços e produtos (Willett e Porter, 2001; Palm et al., 2007; Pokharel, 2007).

2.2. Técnicas de conservação

A maneira como as terras são apropriadas está conduzindo à exaustão dos solos e à contaminação dos recursos hídricos. Cada vez mais recursos devem ser aplicados para sustentar a maneira predatória com que o ser humano trata as terras ocupadas do planeta. É extremamente necessário que as pessoas comecem a transformar as técnicas e métodos danosos que vêm sendo utilizados pelos diversos tipos de cultura e exploração do território. Em culturas convencionais, práticas de conservação são necessárias, pois melhoram a qualidade dos recursos hídricos através do retardamento da erosão (Figura 4).

Para a efetiva aplicação de técnicas conservacionistas é necessário (i) controle de drenagem por terraceamento; (ii) conversão de terras cultivadas em áreas de conservação; (iii) gestão de nutrientes; (iv) reflorestamento de áreas de encostas; (v) avaliação das interações



1) Terreno desmatado. 2) Terreno cultivado morro abaixo. 3) Assoreamento de rios e açudes. 4) Erosão com voçoroca invadindo terras cultivadas. 5) Êxodo rural. 6) Lavouras cultivadas sem proteção. 7) Pastagem exposta à erosão. 8) Inundação.



1) Terreno com exploração florestal. 2) Terreno cultivado em curvas de nível e outras práticas conservacionistas. 3) Rios e açudes livres de assoreamento. 4) Cultivo com práticas conservacionistas. 5) Desenvolvimento de comunidades agrícolas. 6) Áreas de pastagens protegidas contra erosão. 7) Áreas de pastagens protegidas. 8) Inundações controladas e áreas agrícolas reaproveitadas.

Figura 4 - Importância da aplicação de técnicas conservacionistas (Fonte: CEPLAC, 2010).

entre as variáveis climáticas e o uso e manejo da terra; (vi) simulação da distribuição da cobertura do solo com modelos; (vii) aplicação de práticas de gestão capazes de capacitar os produtores; (viii) diminuição das terras para pastagens; (ix) planejamento para a urbanização; (x) e, finalmente, planejamento participativo dos usuários visando envolver as comunidades residentes (adaptado de Willett e Porter, 2001; Chiang et al., 2010; Bossio et al. 2011).

Atualmente, uma nova perspectiva de utilização das terras já está disponível para todos e está relacionada à manutenção da biodiversidade e proteção dos solos e cursos d'água. Isto se dá por meio da conservação da cobertura vegetal e da utilização de modos de produção agroflorestais que imitam as ações da natureza e respeitam seus ciclos e sucessões. A implantação de Sistemas Agroflorestais - SAFs possibilita a diversificação e o incremento da produção de produtos sem a utilização de agrotóxicos e fertilizantes químicos, melhorando a

qualidade de vida dos produtores familiares e aumentando a oferta de produtos orgânicos disponíveis para consumo (May et al., 2008).

A aplicação de técnicas de exploração da sinergia entre práticas de conservação do solo e da água, em conjunto com o gerenciamento integrado de nutrientes, através da implantação de fontes orgânicas e minerais, é determinante para que ocorra a potencialização das propriedades físicas e biológicas do solo. Com o solo reparado ocorre acréscimo da biomassa de carbono e de nitrogênio e, com isso, a capacidade produtiva do solo é aumentada (Sahrawat et al., 2010). Técnicas conservacionistas e implantação de novas formas de produção são ainda mais importantes em bacias hidrográficas utilizadas como mananciais superficiais, principalmente no entorno de cidades, uma vez que estas áreas são de fácil contaminação devido à proximidade com os centros urbanos e são mais sensíveis por fornecerem água para consumo. Portanto, estas áreas devem ser conservadas e preservadas a fim de servirem como reservas de abastecimento futuro e também para minimizar os preços do tratamento da água.

Diversas são as formas de degradação ambiental, porém, o suprimento da vegetação e sua exposição às intempéries climáticas é, provavelmente, o que de pior pode ocorrer para o solo (Figura 5).



Figura 5 - Exemplo de solo exposto por uso inadequado (Fonte: Avanzi, 2010).

A cobertura vegetal é a defesa natural do terreno contra a erosão, pois a vegetação protege o solo contra o impacto das gotas, aumenta a infiltração da água no solo pela ação das raízes, amplia a reserva de matéria orgânica aumentando a capacidade de retenção de água e diminui a velocidade do escoamento pelo aumento do atrito com a superfície. A matéria orgânica é capaz ainda de reter de duas a três vezes o seu peso em água, aumentando assim a capacidade de infiltração e diminuindo a erosão (Bertoni e Lombardi Neto, 1999). Em geral, a perda de solo diminui quando a cobertura vegetal aumenta, portanto, o manejo adequado e a utilização dos resíduos na lavoura oferecem grande oportunidade para a conservação do solo e da umidade (Wischmeier e Smith, 1972).

A cobertura vegetal é o fator passível de ser alterado pelo homem e através de seu manejo é possível devolver ao solo a fertilidade e reconduzir a harmonia aos ecossistemas locais. Assim sendo, a cobertura vegetal deve ser mantida de maneira que os solos e os recursos hídricos permaneçam protegidos (Figura 6).

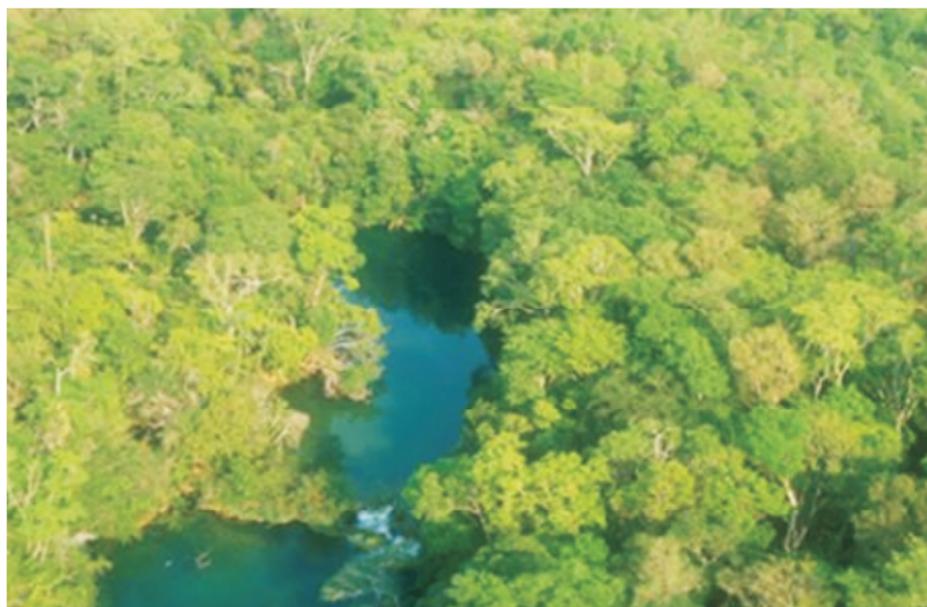


Figura 6 - Exemplo de mata ciliar protegendo o curso d'água (Fonte: Reis e Rogalski, 2006).

Os solos expostos sofrem com a ação das chuvas e com as temperaturas elevadas, pois estas aceleram os processos de arraste de sedimentos e decomposição, exaurindo a reserva de matéria orgânica. A degradação do solo é determinada pela intensidade e pelo tipo de ocupação, sendo a erosão, física, química ou biológica, destacada como o maior tipo de degradação ambiental e também o mais visível. Estudos de degradação do solo revelam que em 1991 havia 2 bilhões de hectares degradados no mundo (Palm et al., 2007), porém estes estudos estão desatualizados por falta de novas estimativas para os dias atuais.

Áreas altamente erodidas devem ser tratadas com prioridade (Zhang et al., 2009), devendo ser recuperadas a fim de servir como reservas de abastecimento futuro e também para minimizar os custos com o tratamento da água. Em áreas onde a erosão laminar ocorre de maneira crítica é necessário que medidas de caráter urgente sejam tomadas. Estas medidas estão relacionadas à adoção de ações de manejo adequado, recuperação e conservação dos solos que, baseadas em estudos sobre as condições locais, possam disseminar uma cultura conservacionista e planejadora do meio ambiente (Farinasso et al. 2006; Pandey et al., 2007). Mediante a introdução de novas técnicas será possível levar em consideração a disseminação de espécies nativas como forma de devolver ao solo a riqueza que lhe foi retirada. Assim, práticas selecionadas de manejo poderão aumentar o teor de matéria orgânica no solo e melhorar sua estrutura como um todo, favorecendo o crescimento das plantas (Portela et al., 2010) e refletindo em recuperação dos solos e maior harmonia entre técnicas de cultivo e ecossistemas naturais.

A instauração de técnicas de conservação do solo passa necessariamente por alguns pontos complexos e importantes de conscientização e participação da comunidade que podem ser destacados para que sejam analisados de maneira integrada, como: (i) os benefícios da utilização de bacias hidrográficas como meio de promover melhorias ambientais, particularmente em escalas que exigem alterações por vários proprietários de terras; (ii) o planejamento, a geração e a transferência de tecnologias apropriadas, de acordo com as especificidades de cada área; (iii) a transmissão do conhecimento por meio de demonstrações práticas e (iv) a participação da comunidade em discussões em grupo, trabalhando em conjunto e defendendo interesses comuns (modificado de Kulkarni et al., 2011). Com medidas desta natureza será possível cada vez mais a transformação da maneira como as terras são utilizadas atualmente para uma forma de apropriação mais inteligente e harmônica com os ecossistemas naturais.

Cidadãos e usuários concordarão mais facilmente com o estabelecimento de programas conservacionistas se conhecerem os detalhes dos problemas de erosão. Levantamentos de solo são importantes, pois revelam a localização e a condição de áreas que necessitam de tratamentos de conservação do solo e da água. São Paulo é o estado que apresenta maior perda de solo por erosão no país, devido à grande intensidade da agricultura paulista, porém, a inserção de usos racionais e mais prudentes poderá conduzir à manutenção mais adequada dos recursos naturais e a uma agricultura mais próspera e permanente,

sustentada por um solo fértil. Se técnicas conservacionistas e estratégias de planejamento forem implementadas de maneira mais precisa, racionalmente e sustentavelmente, em longo prazo, será possível proteger a qualidade dos solos e dos ecossistemas e garantir a longevidade dos reservatórios (Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Beskow et al. 2009).

2.3. Equação Universal de Perda de Solo

A obtenção da estimativa de perda de solo constitui informação necessária para proprietários locais e agentes de governo interessados no levantamento das condições de suas terras e no desenvolvimento sustentável. Modelos de simulação de erosão, especialmente modelos de distribuição espacial, são úteis para avaliar diferentes estratégias de uso do solo a serem adotadas na recuperação de bacias (Bertoni e Lombardi Neto, 1999; Fistikoglu e Harmancioglu, 2002).

A estimativa da quantidade de erosão, para bacias hidrográficas, pode ser obtida por meio da Equação Universal de Perda de Solo - EUPS, o modelo matemático mais simples de predição de perda de solo, e a equação de erosão mais utilizada no mundo (Fistikoglu e Harmancioglu, 2002; Pandey et al., 2007; Zhang et al., 2009; Beskow et al., 2009) (Figura 7). A EUPS pode ser aplicada com poucos recursos financeiros se dados para a bacia estiverem disponíveis (Wischmeier & Smith, 1978). Os modelos convencionais de perda de solo envolvem a necessidade de grande quantidade de dados e muitos parâmetros de correção, requerem laboratórios complexos e dados de campo difíceis de coletar e caros de serem obtidos, o que pode ser inviável para muitos países em desenvolvimento (Beskow et al., 2009). Outra vantagem da utilização da EUPS, de acordo com Fistikoglu e Harmancioglu (2002), está relacionada ao fato de que esta fornece estimativas de médias anuais para perda de solo para pequenas áreas, podendo ser considerada um bom modelo.

Entretanto, as limitações da EUPS estão relacionadas ao fato dela não incluir a perda de solo das voçorocas, nem a estimativa da deposição dos sedimentos em áreas específicas. Outra limitação é que a equação necessita de dados de longa data para estabelecer fatores como R (erosividade da chuva) e K (erodibilidade do solo) (Beskow et al. 2009).

A aplicação efetiva da EUPS, para pequenas e grandes bacias hidrográficas, permite que sejam modelados os valores de perda de solo. Alguns tipos de informações sobre a área de estudo são requeridas para que o modelo reflita as características da área, sendo : (i) registros pluviométricos; (ii) tipos de solos e suas propriedades; (iii) informações topográficas

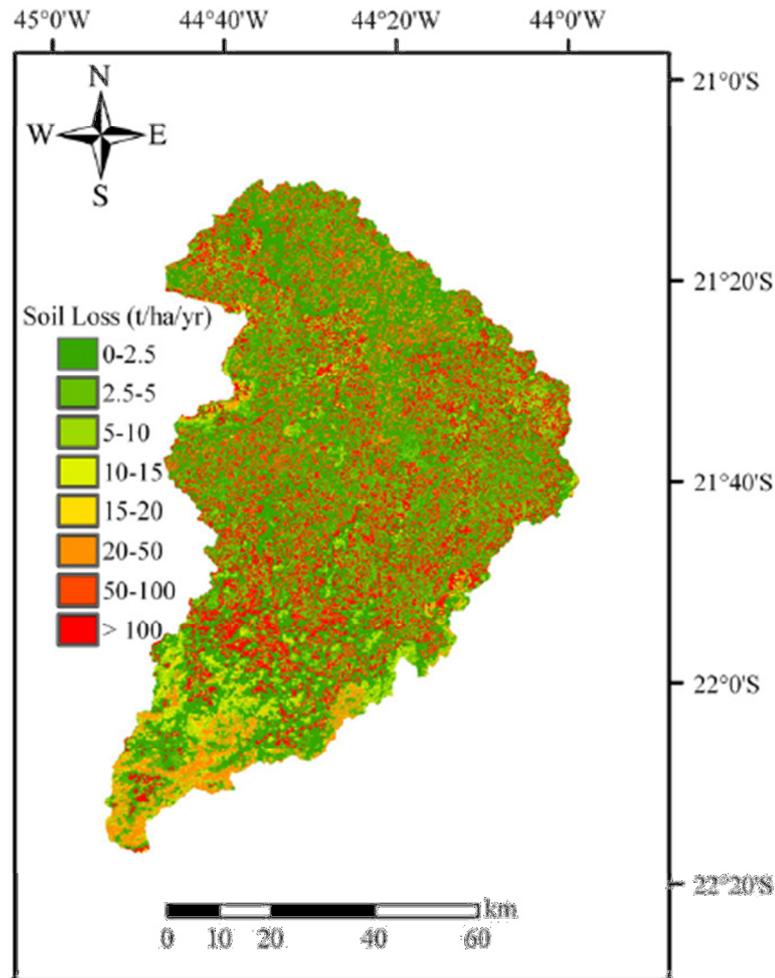


Figura 7 - Mapa de Perda de solo da bacia do Rio Grande, MG (Fonte: Beskow, 2009).

e (iv) mapa de uso e ocupação. A equação pode ser aplicada para diversos cenários, e modificando o fator cobertura do solo, os proprietários podem visualizar as melhores maneiras de gerir suas terras (Wischmeier e Smith, 1972).

Estas informações estão sintetizadas na Equação Universal de Perda de Solo - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978) - modelo multiplicativo simples, no qual a perda média anual de solo é dada em massa por unidade de área por tempo (ton/ha/ano), sendo composta pelo produto de seis fatores como mostra a Equação 1:

$$[1] \quad A = R * K * L * S * C * P$$

Onde: o fator R representa a erosividade da chuva; o fator K a erodibilidade dos solos; o fator L o comprimento de rampa; o fator S a declividade; o fator C a cobertura do solo e o fator P refere-se às práticas conservacionistas.

As informações de pluviosidade determinam a erosividade da chuva ou fator R, definido como o potencial da chuva em causar erosão do solo, o qual depende das características físicas da chuva como: tamanho, forma e velocidade terminal de queda das gotas. Combinadamente, estas características determinam a energia cinética total da chuva (Moreti et al., 2003).

O tipo e a natureza do solo determinam a erodibilidade do solo ou fator K. Este fator leva em consideração as propriedades físicas de cada solo, tais como estrutura, textura, porosidade e características químicas e biológicas que exercem diferentes influências sobre o processo de erosão (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

O Fator topografia trata das diferentes formas do relevo e depende da declividade (S) e do comprimento de rampa (L). É parâmetro essencial para a quantificação da erosão, devido à influência da velocidade e da quantidade do escoamento superficial (Beskow et al., 2009).

A ocupação do solo ou fator C é um fator de redução da vulnerabilidade do solo à erosão. Esse fator representa a taxa de perda de solo de uma área com determinada cobertura e gestão em relação à mesma área descoberta. É um fator importante da equação, pois representa as únicas condições passíveis de serem modificadas pelo homem para reduzir ou aumentar os processos erosivos (Beskow et al. 2009). O último fator, o fator P, é determinado pela utilização ou não de práticas conservacionistas nos sistemas de cultivo (Wischmeier e Smith, 1972).

2.4. Modelo Digital do Terreno proveniente da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

Os Modelos Digitais do Terreno - MDTs, chamados também de modelos de elevação do terreno, ou, em inglês *Digital Elevation Model* - DEM, ou ainda Modelos Numéricos do Terreno - MNT (Figura 8) possuem diversas aplicações, como (i) elaboração de mapas hipsométricos e de declividade; (ii) elaboração de mapas de concavidade e convexidade para análises morfológicas; (iii) elaboração e análises da rede hidrográfica; (iv) delimitação de bacias e áreas inundadas; (v) criação de animações e perfis topográficos e longitudinais; (vi) correção geométrica e radiométrica de imagens de sensoriamento remoto; (vii) aplicação em modelos de predição de perda de solo e elaboração de cenários de ocupação (adaptado de Carvalho e Bayer, 2008).

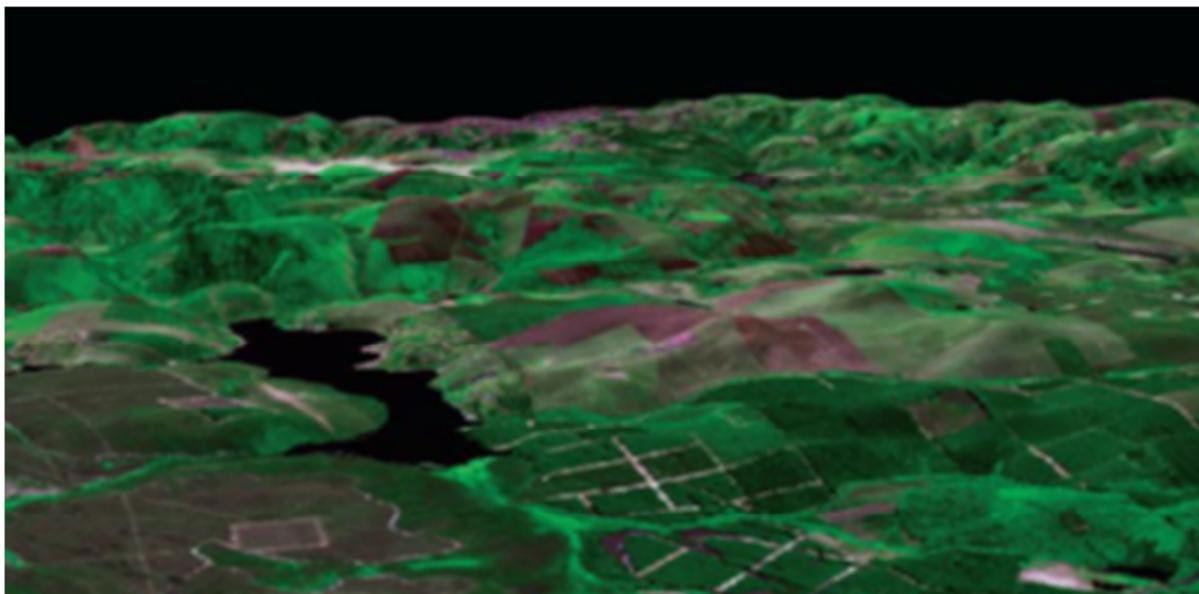


Figura 8 - Exemplo de Modelo Digital do Terreno. Área alagada a montante da Represa da UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa) (Fonte: Tundisi e Matsumura, 2010).

O MDT/SRTM - Modelo Digital de Terreno proveniente da *Shuttle Radar Topography Mission* – foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), em parceria com a agência espacial Italiana e a agência espacial Alemã. Em Fevereiro de 2000, por meio de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR), técnica que consiste na utilização de emissão de ondas duplicadas, a SRTM gerou dados numéricos de relevo e topografia de regiões em todo o globo (Rabus et al., 2003; Miranda, 2005).

O instrumento que gerou os produtos SRTM consiste em uma plataforma espacial de imageamento por radar de abertura sintética - SAR e SIR (*Space Imaging Radar*) nas bandas X e C, respectivamente, instalado em uma antena de 60 metros de comprimento acoplada ao ônibus espacial, proporcionando o registro de imagens por interferometria - InSAR, com visada lateral de 30° a 58° off-nadir (Carvalho e Bayer, 2008) (Figura 9).

O aumento da disponibilidade de fontes de dados topográficos possibilita o surgimento de resultados razoáveis para modelos ambientais. Vente et al. (2009) concluíram que o MDT/SRTM é a fonte mais acessível de informação topográfica para aplicação de modelos em escalas global e regional. Os dados são gratuitos e, para a América do Sul, o MDT/SRTM a partir da banda C está disponibilizado desde 2003, com resolução de 3arcsec ($\approx 90\text{m}$) (Valeriano e Rossetti, 2008).

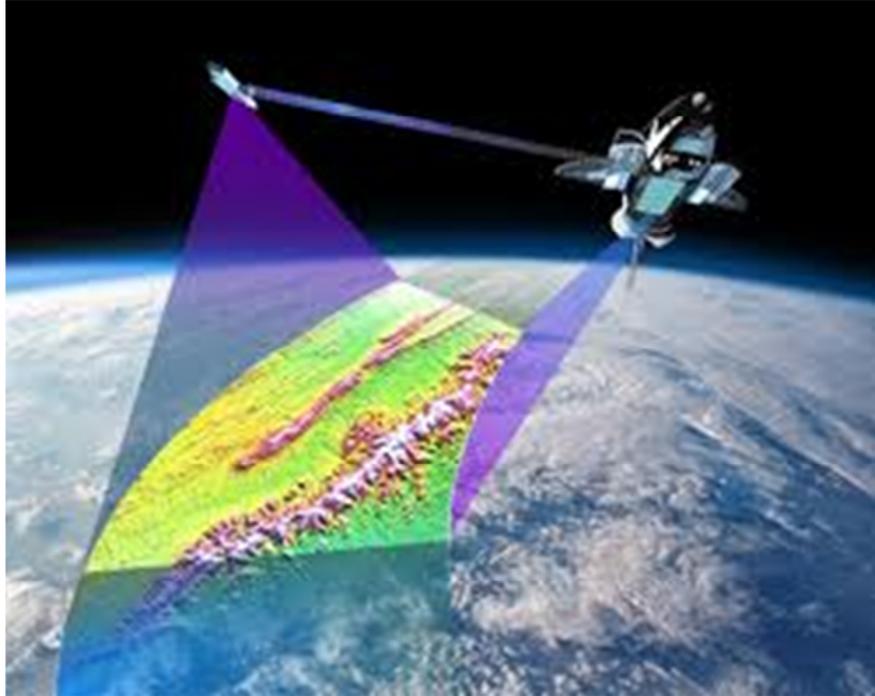


Figura 9 - Esquema demonstrativo da plataforma espacial de imageamento que gerou os dados da SRTM (Fonte: www.altamontanha.com/srtm, capturado em 16/06/2012).

No Brasil, a Empresa Brasileira de Agropecuária - Embrapa, dentro do projeto Brasil em Relevo, tratou os dados brutos, cujos resultados, MDTs corrigidos, estão disponibilizados no *website* da própria instituição.

O MDT/SRTM possui diversas aplicações em análises ambientais, podendo ser usado em estudos geomorfológicos e análises de rede hidrográfica, oferecendo facilidade de análise em diferentes ângulos da área em estudo, perfis topográficos e longitudinais, além do uso para correção de imagens de sensoriamento remoto (Carvalho e Bayer, 2008; Paz e Collischonn, 2008; Robaina et al., 2010).

Pinheiro (2006), ao avaliar a precisão altimétrica do MDT/SRTM corrigido pela Embrapa, demonstrou que as altitudes medidas e apresentadas pela missão apresentaram resultados melhores do que os MDTs gerados a partir de cartas topográficas. Porém, o autor ressalta que, devido a sua resolução espacial, o uso do MDT/SRTM é mais adequado em escalas de 1:250.000 ou menores.

Também são vantagens do MDT/SRTM a praticidade e a minimização de custos e tempo de execução dos trabalhos, além do melhor detalhamento para grandes áreas, quando comparados às cartas topográficas (Neves et al., 2008). Entretanto, estes dados necessitam de avaliação antes de serem usados com segurança. Autores (Di Luzio et al., 2005; Hancock et al., 2006; Vente et al., 2009; Lin et al., 2012) demonstraram que para pequenas bacias (até

5.000ha) a resolução de $\approx 90\text{m}$ dos dados da SRTM fornece uma representação insatisfatória dos limites da bacia e que, portanto, é necessária precaução para a escolha dos dados de entrada. A preocupação maior é com a precariedade da resolução na determinação correta dos limites da bacia. Os dados não possuem resolução suficiente para captar toda a drenagem e junções de rios, o que conduz à perda de cursos d'água e área de contribuição e, conseqüentemente, os valores de perda de solo são subestimados (Di Luzio et al., 2005; Hancock et al., 2006; Lin et al., 2012). O MDT/SRTM é recomendado para avaliações qualitativas em grandes bacias, enquanto que avaliações quantitativas de hidrologia e geomorfologia devem ser desenvolvidas com cuidado (Hancock et al., 2006; Vente et al., 2009).

2.5. Integração da equação universal de perda de solo e sistemas de informações geográficas

Estudos de avaliação das condições do solo e sua disposição espacial e temporal são desafios para pesquisas relacionadas ao tema. Existe a necessidade de desenvolvimento de técnicas eficientes e baratas para estimativas das condições dos solos e de bacias hidrográficas. Essa demanda está relacionada à produção de trabalhos de qualidade realizados a baixos custos de pesquisa e resultados em monitoramento e modelagem de risco e avaliação (Palm et al., 2007). A utilização de tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica - S.I.G. e de Sensoriamento Remoto - S.R. como ferramentas eficientes de avaliação territorial, é amplamente difundida atualmente e facilita a tomada de decisão em gestão ambiental. Essas ferramentas podem ser integradas para estabelecer um sistema de informações ambientais que permite o desenvolvimento de levantamentos, avaliações e monitoramentos de bacias hidrográficas. Desta forma, as análises e a tomada de decisão em planejamento podem ser inseridas em um quadro passível de ser acessado pelos membros dos times em diferentes locais em diferentes horários (Fistikoglu e Harmancioglu, 2002; Silva e Santos, 2008).

Tecnologias modernas fornecem ferramentas eficientes como modelos avançados, sensoriamento remoto, imagens de satélite, SIG e sistemas especializados para dar suporte à tomada de decisão em gestão ambiental. Essas ferramentas podem ser integradas para estabelecer um sistema de informações que permite o teste e a avaliação de cenários alternativos. Com isso, a decisão sobre o manejo mais adequado acontece fundamentada em informações que são facilmente acessadas e compreendidas por usuários em níveis locais e

globais (Fistikoglu e Harmancioglu, 2002; Pandey et al., 2007). Novas técnicas de sensoriamento remoto constituem ferramentas importantes para pesquisas, identificação, classificação e monitoramento de diversos tipos de recursos naturais. Os dados de SR fornecem informações precisas e em tempo real para vários aspectos da bacia, como uso e ocupação, fisiografia, distribuição pedológica, drenagem, etc. (Pandey et al., 2007). Esses dados, se combinados a um Sistema de Informação Geográfica - SIG, representam recurso valioso para a tomada de decisão sobre a ocupação ideal (Baban e Yusof, 2001).

A aplicação da Equação Universal de Perda de Solo - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978) com o suporte de um SIG e técnicas geoestatísticas tem recebido atenção especial de pesquisadores (Beskow et al., 2009), sendo que diversos autores (Moreti et al., 2003; Prado e Nobrega, 2005; Farinasso et al., 2006; Pandey et al., 2007; Zhang et al., 2009) demonstraram relevante potencial na sua utilização como ferramenta de gestão de solo. Os resultados da utilização do SIG para a aplicação de modelos matemáticos são dispostos em mapas, através dos quais são gerados os dados numéricos das relações entre as diferentes variáveis envolvidas no modelo, o que facilita a visualização dos dados por qualquer pessoa. Um modelo matemático tem suas capacidades potencializadas e se torna mais preciso quando integrado a um SIG (Pandey et al., 2007), já que o SIG gera, rapidamente, mapas de entrada para aplicação do modelo, permitindo a elaboração de diversos cenários estratégicos, além de tornar possível a análise detalhada da distribuição espacial da área de estudo (De Roo, 1996 apud Fistikoglu e Harmancioglu, 2002). O mapeamento da erosão do solo, usando a integração entre sensoriamento remoto e SIG, pode identificar áreas que apresentam potencial risco de extensiva erosão inclusive em locais de difícil acesso, sendo que essa integração pode ainda fornecer informação dos valores estimados de perda de solo para diferentes locais (Baban e Yusof, 2001; Pandey et al., 2007).

No entanto, a qualidade dos resultados obtidos está fortemente relacionada às condições tecnológicas disponíveis para o levantamento e manipulação da informação. O desenvolvimento e a implementação de um sistema integrado de ferramentas de conservação do solo é frequentemente dificultado por problemas como: (i) falta de dados adequados e confiáveis para as áreas estudadas; (ii) falta de comunicação entre as pessoas que desenvolvem as ferramentas e manipulam os dados; (iii) falta de treinamento e acesso à informação correta para o adequado tratamento dos dados e manipulação das ferramentas; (iv) dificuldade de consentimento entre as diferentes organizações que são responsáveis pelos

vários estágios do processo de gestão (Fistikoglu e Harmancioglu, 2002). Portanto, precaução é necessária na escolha dos dados e ferramentas que serão utilizados.

2.6. Índice Kappa

Com o advento de técnicas mais avançadas de sensoriamento remoto, a necessidade de avaliação da acurácia dos novos dados recebeu novo impulso. Muitos dados estão disponíveis, porém, a diversidade de escalas e de maneiras de obtenção das informações nem sempre gera dados apropriados para os diversos tipos de estudos. Devido à complexidade da classificação digital existe grande necessidade de se avaliar os dados disponíveis. Em mapeamento temático, o termo acurácia é geralmente utilizado para expressar o grau de acerto de uma classificação. Assim, um erro é uma discrepância entre a situação representada no mapa temático e o mapa referência. Apesar disto parecer simples, há vários problemas que limitam a valor e uso de mapas temáticos dentro do SIG (Foody, 2009). Estimar a acurácia de um mapa de cobertura do solo, gerado a partir de dados de sensoriamento, é fundamental para que este seja utilizado adequadamente.

A maneira mais comum de se avaliar a precisão de dados de sensoriamento remoto é através de uma matriz de erro, também conhecida como matriz de confusão, matriz de correlação ou tabela de contingência, sendo uma matriz quadrada de números estabelecidos em linhas e colunas que expressam o número das unidades amostrais (Congalton, 1991). A diagonal da matriz representa a coincidência entre os dados classificados e os dados de referência. A matriz de erro oferece o coeficiente Kappa - K, um dos mais utilizados e eficientes na determinação da exatidão (Cohen, 1960; Congalton e Green, 1993; Foody, 2009). O índice Kappa é obtido mediante a adoção de uma referência para a comparação dos mapeamentos produzidos e pode variar de -1 a 1, indicando a qualidade da classificação realizada.

Geralmente, os dados de referência ou de fundo usados na avaliação da acurácia em mapas temáticos são assumidos como uma representação precisa da realidade, entretanto, o conjunto de dados de referência pode conter erros. Estes problemas com a exatidão dos dados de referência podem ser particularmente graves se dados de sensoriamento remoto são usados como referência. A matriz de erro resultante e o resultado da avaliação da precisão podem ser distorcidos significativamente por erros nos dados de referência. Em alguns

estudos, portanto, pode ser importante saber os métodos da aquisição dos dados de referência, uma vez que isso pode influenciar sua acurácia e adequação para se comparar com o mapa temático (Foody, 2009).

2.7. Trabalhos anteriores relevantes realizados na área de estudo

Neste item estão descritos alguns trabalhos realizados na área de estudo que foram utilizados como referência para o desenvolvimento desta dissertação. Além dos trabalhos descritos neste item, o Anexo 1 apresenta o projeto de Políticas Públicas intitulado “Uso atual e potencial do solo no município de São Carlos, SP - base do planejamento urbano e regional”, processo nº. 98/10924-3 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e todos os outros trabalhos que compõem o projeto maior.

Pons, Pejon e Zuquette (2007) fizeram um levantamento geológico-geotécnico das áreas degradadas e em processo de degradação na área urbana e de expansão da cidade de São Carlos, quando as informações do meio físico foram integradas e representadas em um SIG. A fotointerpretação de fotografias aéreas de diferentes datas e imagem do satélite Ikonos com resolução espacial de um metro permitiu identificar a maioria das áreas com degradação. Estas áreas da zona urbana, em sua maioria, foram comprometidas pela ocupação inadequada que não considera as condições ambientais existentes e estão relacionadas à erosão, ao desmatamento de nascentes, à retirada da mata ciliar, ao assoreamento de cursos d’água e às áreas de mineração.

Com o intuito de contribuir com um planejamento territorial que preveja o estabelecimento de áreas de conservação e adequação das atividades desenvolvidas na região, através da restrição da ocupação de áreas ambientalmente instáveis no manancial do Feijão, Cunha et al. (2011) elaboraram um mapa de vulnerabilidade ambiental (Figura 10).

Este mapa representa o comportamento da bacia por meio das relações entre as variáveis ambientais cobertura do solo, pedologia, geologia, pluviosidade e geomorfologia. Os resultados apontam para o relevo como sendo a variável mais significativa em termos de fragilidade na região das Cuestas, que formam paredões com declividades muito altas em diversas áreas da bacia, em seguida a cobertura do solo, que aponta para diversas áreas com solo descoberto devido à utilização inadequada por parte dos usuários. Seguindo os aspectos

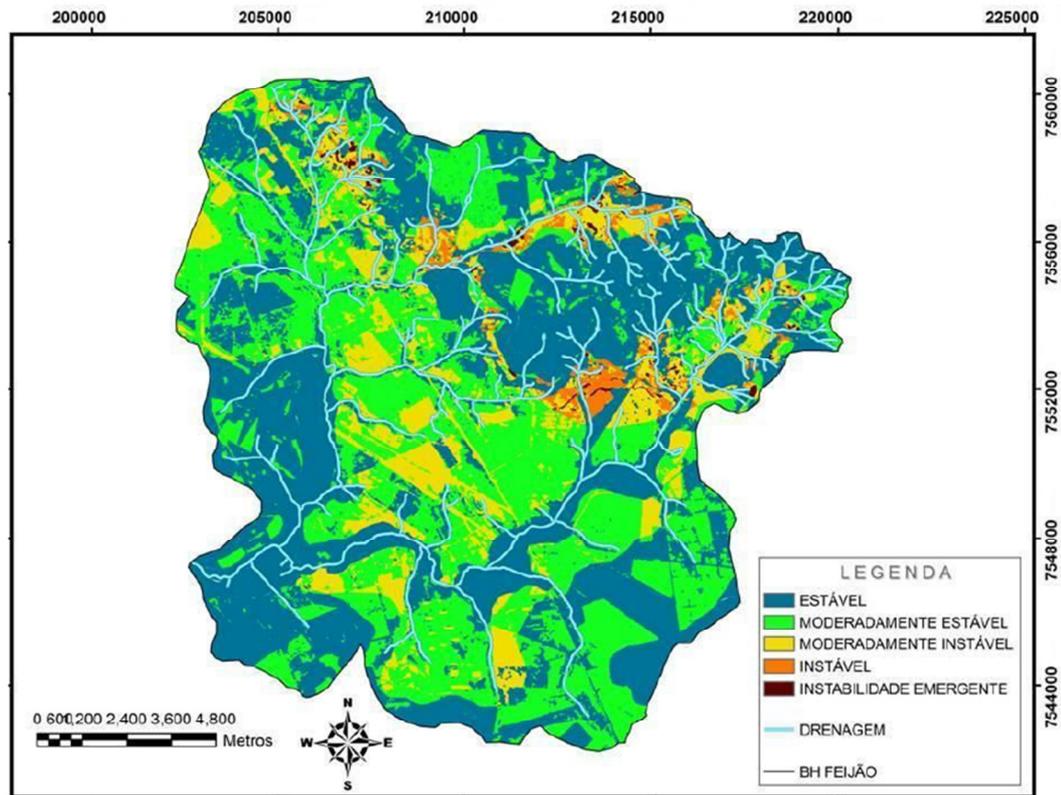


Figura 10 - Zoneamento da vulnerabilidade ambiental no manancial do Ribeirão do Feijão (Fonte: Cunha et al., 2011).

pedológico, a geologia e a pluviosidade, respectivamente, são as variáveis responsáveis pela fragilidade ambiental encontrada para a bacia. As áreas que apresentaram maiores fragilidades foram consideradas instáveis e de instabilidade emergente como mostra a Figura 10. Nota-se que a maior parte da bacia não apresenta grandes vulnerabilidades, por tratar-se de terrenos aplainados, o que faz com que ela possa ser explorada produtivamente, desde que seja realizado um planejamento, já que é uma bacia de abastecimento urbano.

A análise de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão sugere que também sejam relacionados ao estudo de vulnerabilidade a estimativa de perda de solos, os deslizamentos de terra, a perda de qualidade das águas de superfície, a variação das características sedimentológicas, entre outros levantamentos de características físicas da região. Desta maneira, é possível que se obtenha uma abordagem integrada de um número maior de variáveis, considerando os fluxos reais de matéria e energia responsáveis pela configuração atual da unidade ecodinâmica. A integração de mais variáveis aos modelos permite a ampliação da complexidade dos estudos e a construção de cenários cada vez mais em conformidade com a realidade das bacias hidrográficas. Com isso, é possível o desenvolvimento de zoneamentos mais consistentes, que forneçam fundamentação sólida para

uma regulamentação do espaço geográfico com intuito de explorar as potencialidades locais e regionais buscando a conservação da estabilidade dos ambientes naturais.

Destaca-se que, enquanto o solo está protegido por cobertura vegetal adequada, as demais variáveis não se mostram com tanta influência sobre a erosão. Por exemplo, quando uma parcela do terreno sobre um determinado tipo de solo, relevo e geologia perde a cobertura, a pluviosidade passa a atuar como agente desagregador do solo e o relevo passa a agir como variável decisiva na aceleração dos processos erosivos. Portanto, a cobertura vegetal é determinante na minimização dos impactos advindos dos processos erosivos. Com isso, o planejamento do uso do solo e dos recursos hídricos é de grande importância para o manejo de bacias hidrográficas já que se trata da única variável passível de ser alterada pela ação humana (Cunha et al., 2011).

Zuquette, Palma e Pejon (2009) elaboraram um zoneamento territorial com base na poluição das águas subterrâneas na região de São Carlos (Figura 11) e Ribeirão Preto.

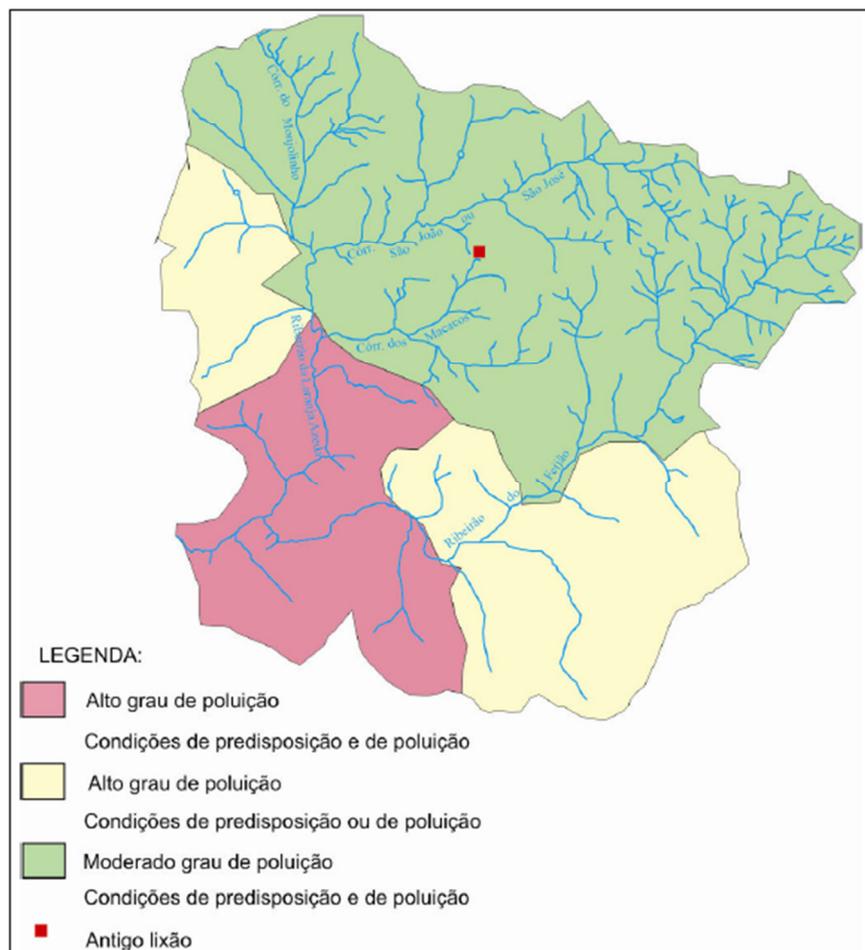


Figura 11 - Condições de predisposição e de poluição de águas subterrâneas no manancial do Ribeirão do Feijão (Fonte: adaptado de Zuquette, Palma e Pejon, 2009).

Os autores dividiram a região em 447 unidades, de acordo com o tipo de uso do solo, tamanho da bacia e homogeneidade do substrato litólico. As unidades foram avaliadas quanto ao grau e predisposição à poluição. Os resultados apontaram para cerca de 30% da região como estando sob risco de alto grau de poluição e 70% com condições de predisposição à poluição devido ao alto índice de urbanização da área. Desta forma, puderam ser identificadas as áreas onde o planejamento territorial deve ser focado, já que a zona urbana está sempre em expansão exercendo pressão contínua sobre a vegetação natural. As áreas identificadas como mais vulneráveis necessitam de acompanhamento dos níveis de poluição com atenção para os adubos químicos, pois, quando usados em excesso são carregados pela chuva e contaminam os recursos hídricos. Dentre as áreas destacadas como com predisposição à poluição está o manancial do Ribeirão do Feijão.

Rodrigues, (2009) realizou uma avaliação da acurácia de mapas gerados através de diferentes mapeamentos de cobertura do solo, obtidos por dois tipos de classificadores digitais, Máxima Verossimilhança e Inferência Fuzzy. Para tanto, analisou a influência da resolução espacial das imagens, para os dois tipos de mapeamentos de cobertura do solo, para os sensores AVNIR-2/ALOS, CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5, com resolução espacial de 10, 20 e 30m respectivamente (Figura 12). Como referência, foram utilizadas fotografias aéreas coloridas e identificados oito tipos de cobertura do solo. Em seguida, foram aplicados os classificadores digitais Máxima Verossimilhança e Fuzzy nas imagens dos sensores citados. Para verificar a acurácia dos diferentes mapas obtidos por meio das diferentes classificações, foram utilizadas matrizes de erro e Índices Kappa.

Os valores de Kappa encontrados para a classificação Máxima Verossimilhança foram de 0,4688; 0,5139 e 0,3144 (AVNIR-2/ALOS, CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5, respectivamente). E, para a classificação Fuzzy os valores de Kappa encontrados foram de 0,5418; 0,5332 e 0,3927 (AVNIR-2/ALOS, CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5, respectivamente). Rodrigues, 2009, concluiu, considerando apenas a resolução espacial dos sensores, que os resultados correspondentes ao sensor AVNIR-2/ALOS apresentaram melhor qualidade, porém, o emprego do sensor CCD/CBERS-2 oferece a melhor relação custo/benefício, uma vez que, diferentemente das cenas do AVNIR-2/ALOS, as imagens do CCD/CBERS-2 são disponibilizadas gratuitamente na rede (assim como as do TM/LANDSAT-5).

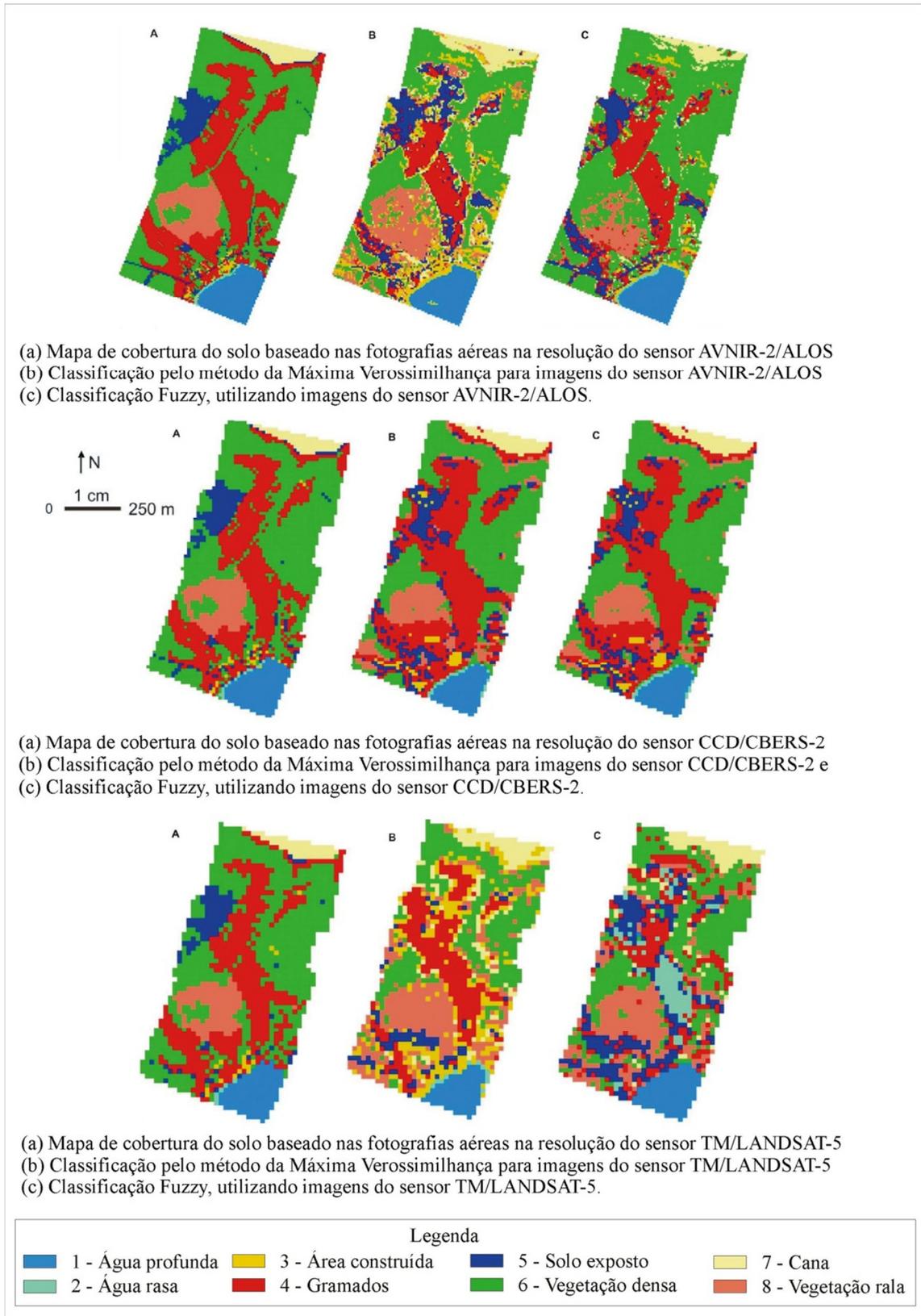


Figura 12 - Imagens comparadas no trabalho de Rodrigues, 2009.

Verificou-se uma relação direta entre acurácia e resolução espacial dos sensores, comprovando-se que a capacidade de um sensor em discernir alvos espectrais é acrescida com o aumento da resolução espacial. Conclui-se também que a qualidade do mapeamento foi superior quando aplicado o classificador Fuzzy, diminuindo consideravelmente o efeito de borda ocorrido pela existência de pixels mistos, dentre outras confusões que possam ocorrer durante a classificação dos pixels. A qualidade da classificação (acurácia) pode ser comprometida pelas áreas de transição, muitas vezes abruptas, entre os temas e por variações nas respostas espectrais dos alvos, como a quantidade de água no solo ou na vegetação em diferentes épocas do ano, como ocorreu neste trabalho.

Capítulo III - Materiais e Métodos

Este item contém a lista dos materiais utilizados, bem como a descrição da área da bacia do Ribeirão do Feijão e também os métodos utilizados para atender aos objetivos propostos.

3.1. Materiais

Para a coleta de pontos de referência *in situ* foi utilizado um GPS - *Global Positioning System* de mão da marca Garmin modelo Etrex; os demais materiais empregados no desenvolvimento desta pesquisa estão descritos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Dados de entrada.

Dados	Escala/ Resolução	Fonte
Topográfica de São Carlos (SF-23-Y-A-I-1)	1:50.000	IBGE, 1972
Topográfica de Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2)	≈90m	Miranda, 2005
MDT/SRTM	1:100.000	Oliveira e Prado, 1984
Pedológica (SF-23-Y-A-I)	10m	Cunha et al., 2011
Mapa de uso e cobertura		

As cartas topográficas têm espaçamento de 20 metros de altitude entre as curvas. O mapa de uso e cobertura elaborado por Cunha et al., (2011) foi feito a partir da imagem de satélite ALOS - sensor AVNIR-2 (bandas 2, 3 e 4), com resolução de 10 metros, de 12 de novembro de 2006.

Tabela 2 - Aplicativos.

Aplicativos	Utilização
Global Mapper 11	Digitalização de vetores
IDRISI Andes 15.0	Elaboração e operação dos mapas
Net Erosividade	Determinação fator R
USLE-2D 4.1	Determinação fator LS
Corel Draw	Finalização dos mapas
MS-Office	Textos, gráficos e tabelas

Os mapas utilizados e produzidos neste trabalho foram convertidos e gerados com o sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), *datum* horizontal Córrego Alegre e *datum* vertical Imbituba.

3.2. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão está situada nos municípios de São Carlos, Analândia e Itirapina, na região nordeste do estado de São Paulo como mostra a Figura 13.

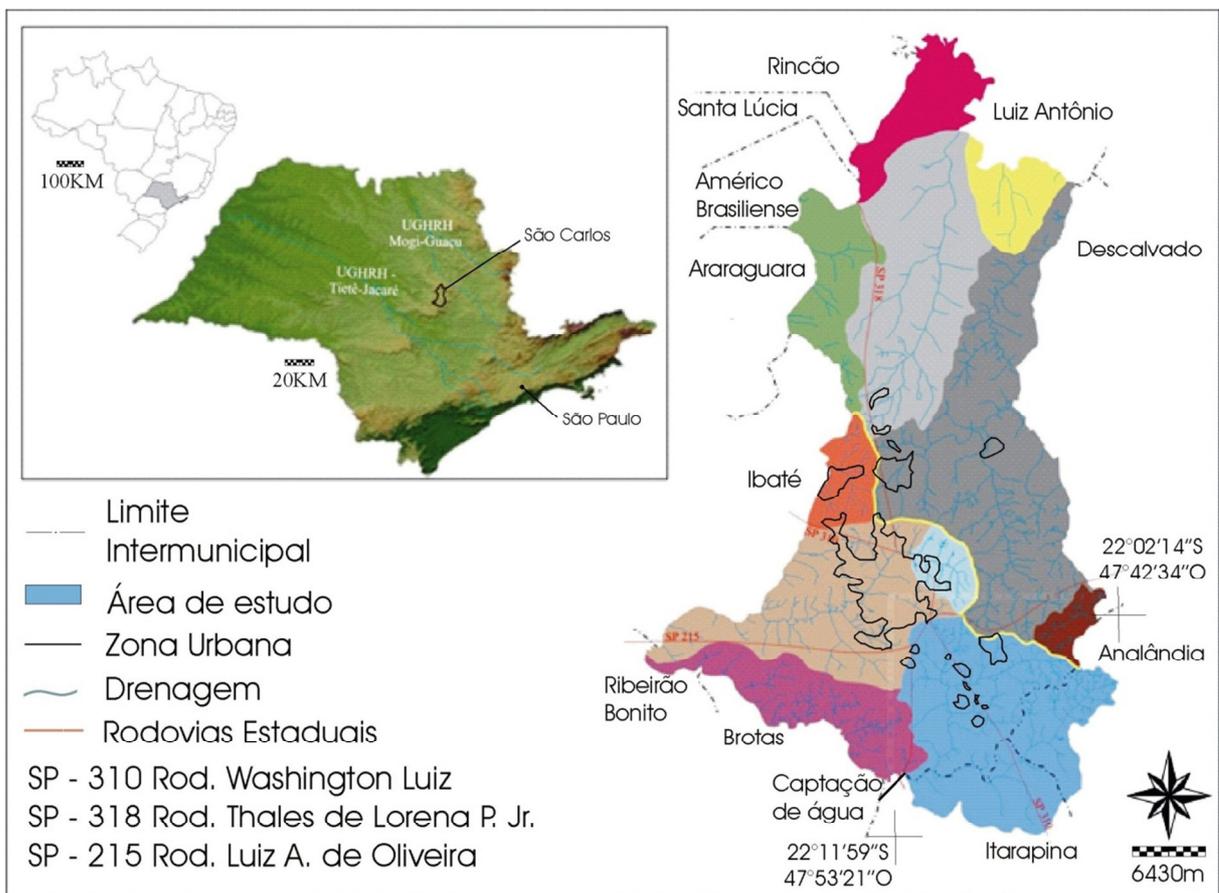


Figura 13 - Localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e no Brasil e da sub-bacia do manancial do Ribeirão do Feijão nos municípios de São Carlos, Analândia e Itirapina, drenagens, municípios do entorno e a mancha urbana da cidade de São Carlos (Fonte: adaptado de Costa et al., 2012).

A bacia possui uma área de 22.269 hectares inserida no polígono de coordenadas 22°12'58" de latitude Sul e 47°52'10" de longitude Oeste e 21°59'53" de latitude Sul e 47°40'21" de longitude Oeste. O Ribeirão do Feijão é o principal manancial de abastecimento da cidade de São Carlos e encontra-se a aproximadamente 13 km do centro da cidade. As

principais drenagens da bacia são o Ribeirão do Feijão e o córrego São José, estes compõem as bacias hidrográficas do Rio Jacaré-Guaçu e, conseqüentemente, do Rio Tietê-Jacaré. Esta última compõe a bacia do rio Tietê, importante rio do estado de São Paulo, intensamente utilizado para geração de energia, abastecimento urbano e navegação.

A bacia está situada sobre o Sistema Aquífero Guarani - S.A.G. um dos mais importantes reservatórios subterrâneos de água doce do planeta. No Brasil, estende-se por oito estados das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. A área de ocorrência do S.A.G possui recursos hídricos superficiais abundantes e cobre uma área de 1,1 milhão de km². Sua localização, associada ao grande potencial hídrico, o torna estratégico para o desenvolvimento econômico e social brasileiro. Portanto, devido à possibilidade de contaminação pela superfície, a gestão adequada do aquífero é fundamental para que o recurso não se perca. É importante considerar que o uso inadequado do solo, via agricultura intensiva, faz com que contaminantes cheguem até o lençol subterrâneo (Zuquette, 1981; Nishiyama, 1991; Tundisi et al., 2006 e 2007; Zuquette, Palma e Pejon, 2009; Sahrawat et al., 2010; IPT, 2011).

O clima da região se enquadra em duas classificações do sistema de classificação climática de Köppen: (i) Cwa, mesotérmico de inverno seco e a temperatura do mês mais quente superior a 22°C, nas porções onde os valores altimétricos estão em torno de 600 metros e (ii) Cwb nas regiões serranas com altitudes entre 800 e 1.000 metros, sendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C.

A pedologia da bacia tem a predominância de Areia Quartzosa Profunda e Latossolo Vermelho Amarelo, os quais apresentam baixa fertilidade e acidez elevada (Nishiyama, 1991). A bacia está inserida na província geomorfológica das Cuestas Basálticas e apresenta, portanto, um relevo levemente acidentado intercalado com elevações de altas declividades (Zuquette, 1981).

Em relação aos aspectos geológicos e geomorfológicos a região faz parte da província geomorfológica das Cuestas Basálticas. Tal província geomorfológica está localizada entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica (Zuquette, 1981). Quanto à geologia, a bacia está totalmente localizada na Bacia Sedimentar do Paraná. Algumas das formações geológicas dessa Bacia aí afloram, tais como: Formação Botucatu, Serra Geral e Sedimentos Cenozoicos (Figura 14).

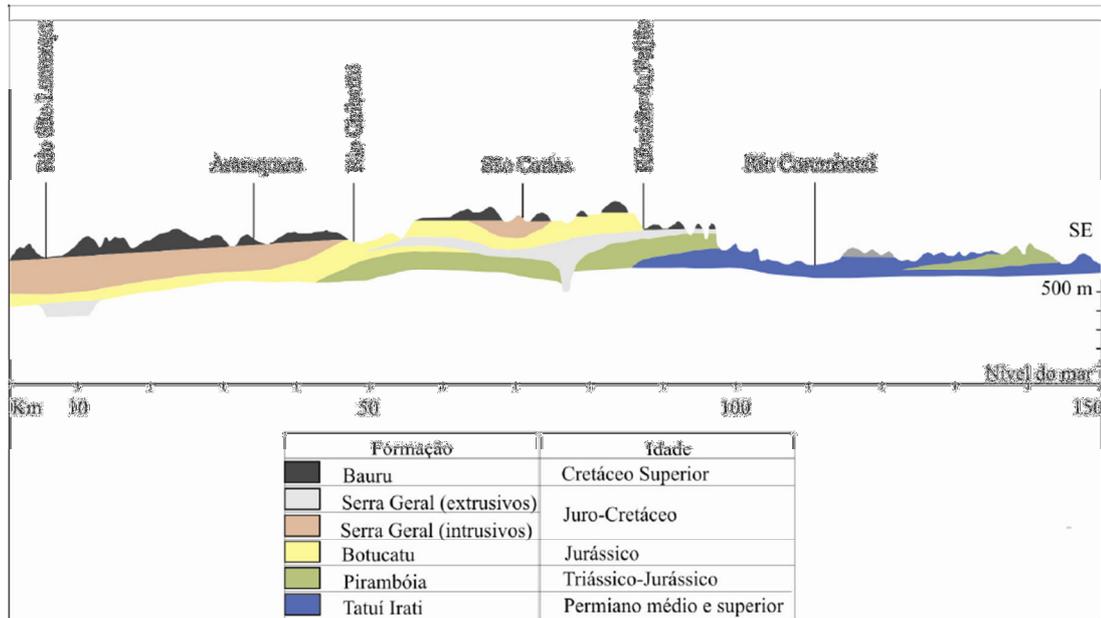


Figura 14 - Seção geológica da região de São Carlos. (Fonte: Costa et al., 2012, adaptado de Zuquette, 1981).

Durante a era paleozoica (545 a 248 milhões de anos - Ma), desde o período Devoniano (417 a 354 Ma), foram depositados na região do estado de São Paulo extensos pacotes sedimentares em ambiente preponderantemente marinho. No Triássico (248 a 206 Ma) o mar regrediu e não mais retornou, quando em ambiente continental, rios e lagos foram formados e o clima se transformou até se tornar inteiramente desértico. Durante este tempo ocorreu a deposição de arenitos eólicos em sucessivos campos de dunas (formações Pirambóia, durante o Triássico, e Botucatu, durante o Jurássico (206 a 142 Ma). No início do Cretáceo (142 a 65 Ma), ainda em condições desérticas, a Bacia do Paraná foi afetada por intenso vulcanismo da Formação Serra Geral, quando sucessivos derrames de lavas basálticas recobriram quase todo o deserto Botucatu. No fim do Cretáceo, já em clima semiárido, foram depositados, sobre os basaltos, seqüências de arenitos calcíferos do Grupo Bauru (DAEE, 2005).

O relevo da região é constituído por mesas e morros isolados. A configuração de planalto, cortado por vales entalhados, é uma das características das zonas de transição entre as Cuestas Basálticas e o Planalto Ocidental. As menores cotas, 775 metros, localizam-se nos vales, enquanto que as maiores cotas estão no planalto e ultrapassam os 1.000 metros de altitude (Nishiyama, 1991).

A vegetação nativa era composta principalmente por campos cerrados, formados pela presença de solos profundos muito permeáveis e com baixo potencial nutricional (Oliveira e Prado, 1984). A vegetação foi rapidamente dizimada, no entanto, poucos

remanescentes ainda persistem em locais com declividades acentuadas ou solos de baixa fertilidade (Nishiyama, 1991). Existem constantes pressões, provindas das atividades relacionadas à expansão urbana e ao agronegócio, que comprometem a qualidade da água superficial e subterrânea. Por se tratar de uma região bastante urbanizada, grande parte da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea já é utilizada. Também é possível identificar grande tendência ao aumento das atividades, devido ao incremento da concentração industrial e populacional prevista para as próximas décadas, fato que pode conduzir a um uso ainda mais intensivo dos recursos como água e solo (Costa, 2010).

A ausência de aplicação de técnicas e o não cumprimento da regulação legal de uso e ocupação do solo, por parte dos usuários da bacia do Ribeirão do Feijão, poderão condenar a qualidade e a quantidade dos recursos disponíveis para todos. O uso intensivo e indiscriminado dos recursos, para abastecer as atividades relacionadas ao agronegócio, provoca impactos negativos sobre a ecologia regional, como a contaminação das águas superficiais e subterrâneas, a erosão dos solos (Tundisi et al., 2006 e 2007; Zuquette, Palma e Pejon, 2009) e, ainda, o assoreamento dos diversos reservatórios que existem ao longo do Rio Tietê, a jusante da bacia.

3.3. Métodos

Para a realização do presente trabalho, foi efetuada a sistematização dos fatores que compõem a EUPS (Equação 1, pág. 24). Estes, posteriormente, foram aplicados ao modelo de predição do Potencial Natural de Erosão - PNE e de Estimativa de Perda do Solo - EPS para os dados topográficos provenientes da carta topográfica 1:50.000 e para os dados originários do modelo digital do terreno da SRTM. Os resultados encontrados para os diferentes dados topográficos foram cruzados em matrizes de erro, a partir das quais foi possível mensurar o índice Kappa para os mapas do fator LS, PNE, EPS e hipsométricos. Todos estes procedimentos estão sintetizados no esquema da Figura 15.

Os resultados de EPS maiores que 100 ton/ha/ano foram cruzados com os fatores erodibilidade do solo, topografia e cobertura com o intuito de identificar as classes de cada fator que mais influenciaram nos maiores valores de perda encontrados. Ao final, de posse dos resultados, foi possível realizar a análise dos resultados de Kappa e fazer a avaliação dos dados provenientes da SRTM.

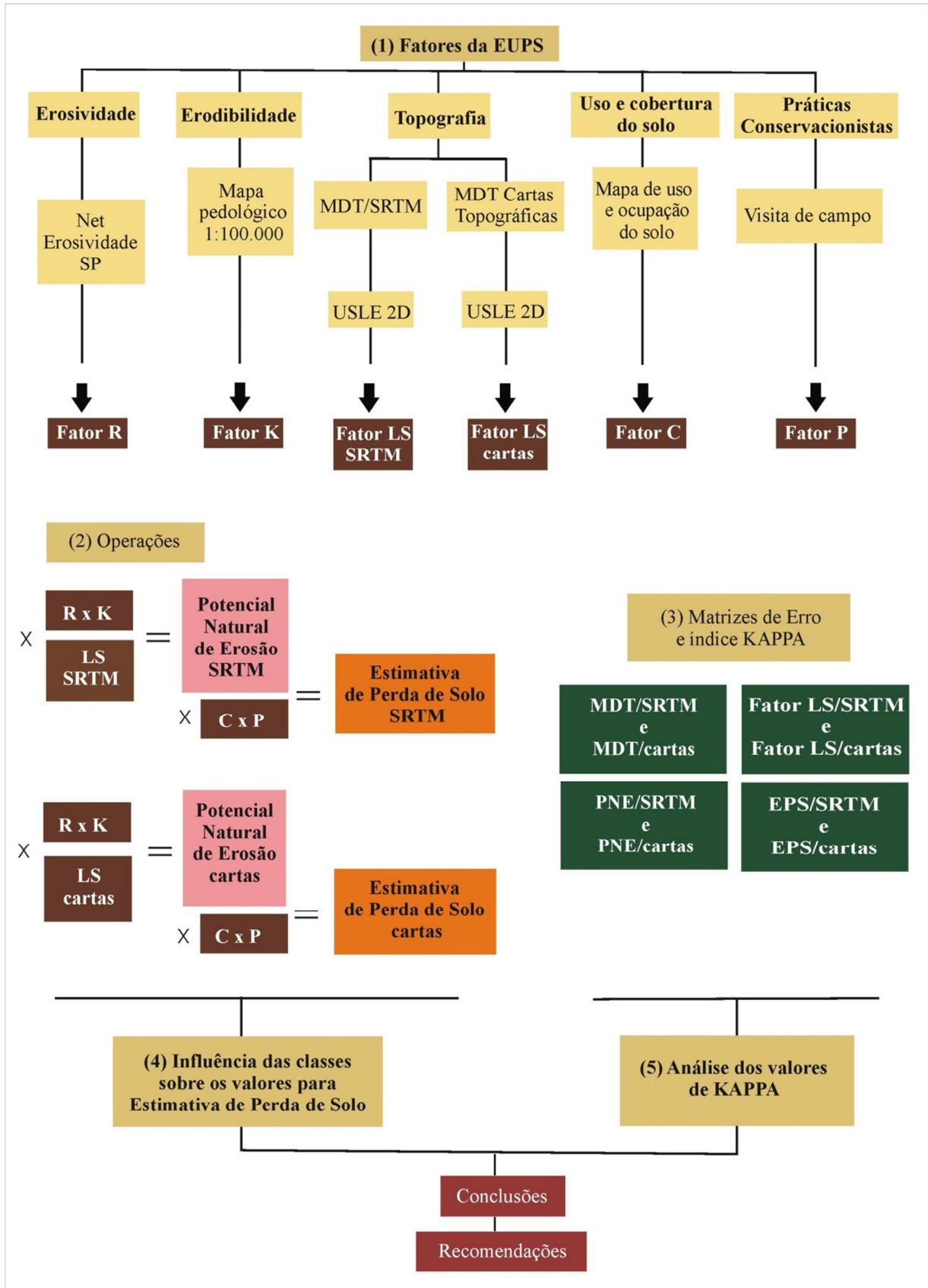


Figura 15 - Esquema simplificado dos procedimentos metodológicos.

Neste item estão descritas as caixas apresentadas no esquema, conforme o procedimento utilizado para realizar as diferentes etapas deste trabalho.

(1) Fatores da Equação Universal de Perda de Solo

A Equação Universal de Perda de Solo - EUPS (Wischmeier e Smith, 1978) é um modelo multiplicativo simples, no qual a perda média anual de solo é dada em massa por unidade de área por tempo (ton/ha/ano). A equação é composta pelo produto de seis fatores, a saber: erosividade da chuva, erodibilidade do solo, declividade do terreno, comprimento da rampa, uso e cobertura do solo e práticas conservacionistas. A determinação de cada fator está descrita a seguir.

Fator Erosividade da Chuva - Fator R

O potencial erosivo da chuva pode ser expresso pela quantidade de solo perdida por unidade de área em um terreno desprovido de cobertura, variando com a declividade, tipo de solo e características da chuva (Lombardi Neto e Moldenhauer, 1992). O cálculo do fator R foi feito por meio do *software* Net Erosividade que utiliza uma rede neural artificial - RNA para estimar os valores de erosividade da chuva para todo o Estado de São Paulo a partir de dados de latitude, longitude e altitude (Moreira et al., 2006).

A determinação da erosividade da chuva depende dos dados de precipitação colhidos por estações pluviométricas. O *software* utilizado faz a interpolação dos dados consistidos de 138 estações pluviométricas do estado de São Paulo, no período de 1961/1990, sendo que esta interpolação foi feita pela RNA que utiliza a Equação 2, proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992).

$$[2] \quad R = \sum EI = \sum \left\{ 67,355 * \left(\frac{r_k^2}{P} \right)^{0,85} \right\}$$

Onde R = erosividade média mensal do mês k; r = precipitação média mensal do mês k, mm; P = precipitação média anual, mm.

A metodologia utilizada para classificar o valor do resultado encontrado para erosividade da chuva foi proposta por Mello et al. (2007) e está apresentada de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Classes interpretativas de erosividade da chuva

Classes de Erosividade (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹)	Interpretação
< 4.905	Baixa
4.905 - 7.357	Média a Alta
7.357 - 9.810	Alta
> 9.810	Muito Alta

Fonte: adaptado de Mello et al. (2007).

Fator Erodibilidade do Solo - Fator K

O fator K mensura a erodibilidade dos diferentes tipos de solo, ou seja, a capacidade que cada tipo de solo tem de erodir perante a ação da chuva. Os valores de K, portanto, estão relacionados às características intrínsecas do solo, como permeabilidade, porosidade, textura e composição.

Para este trabalho, os valores de K foram obtidos a partir de consulta à literatura especializada. Estes valores foram relacionados à distribuição espacial pedológica da área. A carta pedológica foi digitalizada e importada em formato *Geo Tiff* para o aplicativo Global Mapper 11 para a vetorização das classes de solos e exportadas para o SIG, onde cada tipo de solo foi relacionado com o valor referente.

A interpretação dos valores encontrados para erodibilidade do solo foi feita a partir da metodologia proposta por Carvalho (1994, apud Silva e Alvares, 2005) e está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Classes interpretativas de erodibilidade dos solos.

Limites de valores (t.h.ha.MJ-1.ha-1.mm-1)	Interpretação
<0.01529	Baixa
0.01529 - 0.03058	Média a Alta
>0.03058	Alta

Fonte: Carvalho (1994 apud Silva e Alvares, 2005).

Fator Topográfico - Fator LS

O fator LS considera a declividade e o comprimento da rampa que determinam a velocidade e o tempo do escoamento e, portanto, influenciam na quantidade de solo erodido.

Neste trabalho, o MDT/SRTM corrigido pela Embrapa foi comparado com o MDT gerado pela digitalização das curvas de nível das cartas topográficas em escala 1:50.000 (IBGE, 1972). Os dois MDTs foram usados como dado de entrada para o *software* USLE-2D (Desmet e Govers, 1996), que calcula o fator LS da EUPS para uma bacia hidrográfica. Para este trabalho utilizou-se apenas uma delimitação da bacia, a encontrada a partir da carta topográfica, adotada como referência, sendo o limite, portanto, igual para os dois mapas.

Para a estimativa dos valores de comprimento de rampa, foi aplicado o modelo hidrológico de composição de fluxo e para a estimativa dos valores de declividade utilizou-se os cálculos propostos por Wischmeier e Smith (1978), como mostra a Equação 3.

$$[3] \quad S = 65,41 \operatorname{sen} 2\theta + 4,56 \operatorname{sen} \theta + 0,065$$

Onde S = fator de declividade (adimensional); θ = declividade (%).

A interpretação dos valores de LS se deu de acordo com a metodologia indicada por Silva e Schulz (2003) e está descrita na Tabela 5.

Tabela 5 - Classes interpretativas do fator LS.

Fator LS	Interpretação
< 1	Amenização
1	Neutralidade
1 a 10	Aumento da perda
10 a 50	Aumento da perda
50 a 100	Aumento da perda
> 100	Aumento da perda

Fonte: Silva e Schulz (2003).

Fator Manejo do Solo - Fator CP

O fator C define a influência da cobertura vegetal e do manejo do solo. Trata-se de um fator importante para a definição das perdas de solo, pois é o único que pode ser alterado pelo homem. Segundo Wischmeier e Smith (1978), este fator consiste na relação esperada entre perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto e outro mantido continuamente cultivado por unidade de área em um local qualquer, comparado com as perdas de solo correspondentes em um comprimento de rampa padrão de 25 metros e declividade de 9%.

Para este trabalho, o fator C foi determinado a partir do mapeamento do uso e cobertura realizado por Cunha et al. (2011), que o fez a partir de uma composição colorida

falsa cor de imagens do satélite ALOS de 2006. Os valores de C foram adotados a partir de consulta à literatura para os 8 temas presentes no mapa de uso e cobertura do solo.

O fator P trata das práticas conservacionistas adotadas para cada tipo de cultura, sendo que o valor 1 considera a pior situação em relação às práticas conservacionistas. Neste estudo, foi considerado que não existem práticas conservacionistas sendo utilizadas na bacia em estudo, portanto o fator P é 1 para toda a bacia.

(2) Operações

Para a estimativa do Potencial Natural de Erosão - PNE foram multiplicados os fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo e comprimento de rampa e declividade, conforme Equação 3. Para este cálculo não se considera a cobertura do solo.

$$[3] \quad A=R*K*LS$$

Onde: A = predisposição à perda de solo, em $t.ha^{-1}.ano^{-1}$; R = fator erosividade da precipitação pluvial e da enxurrada, em MJ.mm/ha/h/ano; K = fator erodibilidade do solo, em ton.h/MJ/mm; L = fator comprimento da encosta, adimensional; S = fator grau de declividade, adimensional.

Para a realização da interpretação dos resultados para o potencial natural de erosão foi utilizada a classificação sugerida por Silva e Santos (2008), de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classes interpretativas de potencial natural de erosão.

Classes de Perda de Solo (ton/ha/ano)	Interpretação
0 - 400	Muito Baixo
400 - 800	Baixo
800 - 1600	Moderado
>1600	Extremamente Severo

Fonte: Silva e Santos (2008).

Para a obtenção do mapa de estimativa de perda de solo, os valores encontrados para os fatores da EUPS foram multiplicados como mostra a equação 1 (pág. 24). Os valores para perda de solo, estimados pela EUPS, são dados em t/ha/ano através da multiplicação de seis fatores: (i) fator erosividade da precipitação pluvial e da enxurrada, dado em MJ.mm/ha/h/ano; (ii) fator erodibilidade do solo, dado em ton.h/MJ/mm; (iii) fator

comprimento da encosta, adimensional; (iv) fator grau de declividade, adimensional; (v) fator de cobertura e manejo da cultura, adimensional; fator práticas de controle da erosão, adimensional.

Para a realização da interpretação dos valores encontrados para a estimativa de perda de solo, utilizou-se a metodologia proposta por Irvem et al. (2007). Esta metodologia está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Classes interpretativas de perda de solo.

Classes de Perda de Solo (ton/ha/ano)	Interpretação
< 5	Muito Baixa
5 - 12	Baixa
12 - 50	Moderada
50 - 100	Severa
100 - 200	Muito Severa
> 200	Extremamente Severa

Fonte: Irvem et al. (2007).

(3) Matriz de erro e Índice Kappa

Para avaliar a precisão do MDT/SRTM foi utilizada uma matriz de erro, que é uma matriz quadrada de números estabelecidos em linhas e colunas que expressam os dados das unidades amostrais (Congalton, 1991). A diagonal da matriz representa a coincidência entre os dados classificados e os dados de referência.

A partir da matriz de erro é possível estabelecer o índice Kappa - K (Cohen, 1960) - um dos mais utilizados e eficientes coeficientes empregados na determinação da exatidão de dados (Congalton e Green, 1993; Foody, 2009). O índice Kappa é obtido mediante a adoção de dados de referência para comparação com os dados produzidos. O valor do índice Kappa varia de -1 a 1, indicando a semelhança entre os dados cruzados, sendo que valores próximos a -1 indicam que os dados são menos parecidos com os dados de referência e valores próximos a 1 indicam que os dados são mais parecidos. Matematicamente, o índice Kappa é expresso pela Equação 4:

$$[4] \quad K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Onde N é o número total de pixels contemplado pela matriz de erro; x é o elemento da matriz de erro; r é o número de categorias presentes na matriz de erro; x_{ii} são os elementos da diagonal principal.

Foram geradas quatro matrizes de erro, que comparam mapas que contêm as mesmas informações, porém foram gerados a partir das duas fontes diferentes de dados topográficos, SRTM e cartas topográficas em escala 1:50.000, estas últimas adotadas como referência para este estudo. A primeira matriz de erro compara os dois mapas hipsométricos. A segunda matriz traz o confronto das informações dos mapas do fator LS. A terceira matriz de erro tem a comparação dos mapas de potencial natural de erosão, gerados a partir das duas fontes. A última matriz de erro carrega as diferenças entre os mapas de estimativa de perda de solo gerados a partir dos dados da SRTM e dos dados da carta topográfica.

(4) Influência de cada classe dos fatores sobre os valores encontrados para a estimativa de perda de solo

Com o intuito de analisar a influência de cada classe dos fatores da EUPS sobre os maiores valores encontrados para estimativa de perda de solo, as perdas maiores que 100 ton/ha/ano foram multiplicadas pelos fatores erodibilidade, topografia e uso e cobertura. Com isso, foi possível inferir quais classes destes fatores estão presentes nas maiores perdas e analisar tais incidências. Os resultados foram dispostos em gráficos e estão apresentados nos resultados.

(5) Análise dos valores de Kappa

Foi feita uma análise dos valores do índice Kappa encontrados, de acordo com a metodologia proposta por Landis e Kock (1977) (Tabela 8).

Tabela 8 - Classes interpretativas do índice Kappa.

Valor de Kappa	Qualidade do mapa
< 0	Pobre
0 - 0.2	Leve
0.2 - 0.4	Razoável
0.4 - 0.6	Moderado
0.6 - 0.8	Substancial
0.8 - 1,0	Quaseperfeito

Fonte: Landis e Kock (1977).

Nesta etapa, foram levadas em consideração as diferenças entre os dois mapas gerados a partir das fontes diferentes e, também, a influência dos outros fatores sobre os valores envolvidos, tanto os de Kappa como os de estimativa de perda de solo.

Capítulo IV - Resultados Obtidos e Análises

Neste capítulo, estão apresentados os resultados, as discussões e as análises sobre o estudo realizado na bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, cuja área é de 22.269 hectares. Primeiramente, estão apresentados os resultados para os fatores da EUPS, e em seguida a análise de sensibilidade de cada um deles com relação às maiores expectativas de perda encontradas. Ao final, estão as matrizes de erro e os índices Kappa encontrados. Nos detalhes dos mapas, estão apresentados os 8 pontos escolhidos para análise dos valores utilizados para o cálculo da estimativa de perda de solo.

Fator R

O valor encontrado para a erosividade da chuva foi de 7.362 MegaJoule.mm/ha/h/ano, que de acordo com Mello et al. (2007), trata-se de um valor de R que pode ser classificado como alto (Tabela 3, pág. 44). Isto significa que a erosividade da chuva exerce grande influência sobre a perda de solo na bacia.

Fator K

De acordo com o mapa pedológico (Figura 16) (Oliveira e Prado, 1984), os solos mais frequentes na bacia estudada são a Areia Quartzosa Profunda - AQ em 42% e Latossolo Vermelho Amarelo - LVA em 33%. A AQ está presente nas partes mais baixas e o LVA nas partes altas da bacia, onde estão as nascentes dos rios. Juntos, esses solos cobrem 75% da bacia e ambos possuem valor de $K = 0.032$ (Tabela 9), valor considerado alto (Tabela 4, pág. 44) de acordo com Carvalho (1994 apud Silva e Alvares, 2005). Ainda com valores altos de erodibilidade, ocorrem na bacia os solos Hidromórficos - Hm, ao longo dos cursos principais de água, estes solos podem ocorrer em áreas que não aparecem no mapa devido à escala. Também com valores altos aparecem os solos Litólicos – Lc nos paredões formados pelas Cuestas Basálticas, e o solo Podzólico Vermelho Amarelo – PVA que juntos, os três, representam 12,8% da bacia. O Latossolo Roxo - LR, o Latossolo Vermelho Escuro - LVE e a Terra Roxa Estruturada - TR possuem valores baixos de K, porém aparecem em apenas 10,9% da área, portanto quase 90% dos solos da bacia apresentam alto valor de erodibilidade.

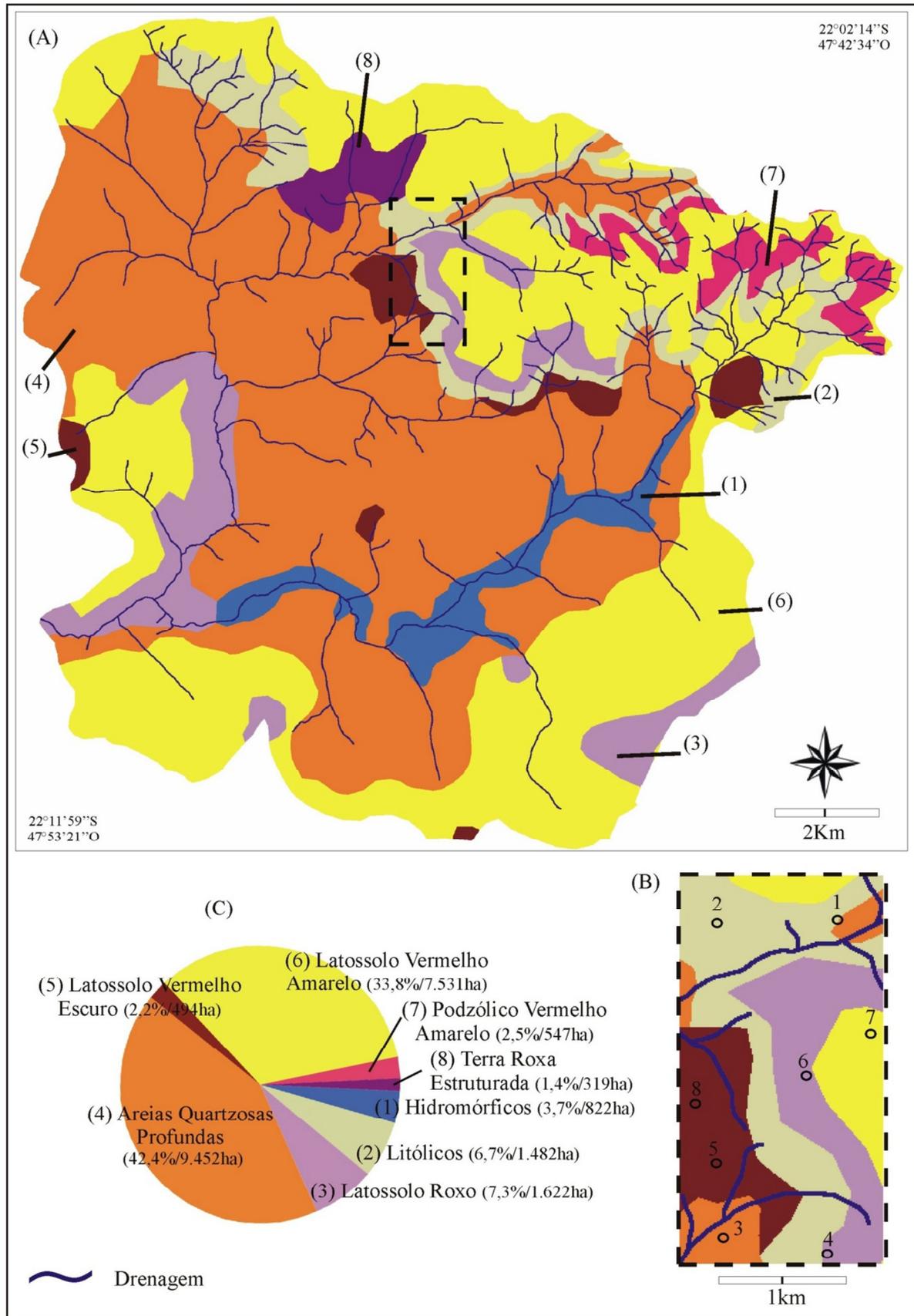


Figura 16 - Mapa Pedológico (Fonte: Carta Pedológica, SF-23-Y-A-I,1:100.000, Oliveira e Prado, 1984).

Tabela 9 - Valores médios de K para os 8 tipos de solo da bacia.

Tipo de solo	Fator k (t.ha.h/ha.MJ.mm)	Fonte
(1) Solos Hidromórficos	0.038	
(2) Solos Litólicos	0.040	
(3) Latossolo roxo	0.013	
(4) Areias quartzosas profundas	0.032	Silva, 2004
(5) Latossolo vermelho escuro	0.014	
(6) Latossolo vermelho amarelo	0.032	
(7) Podzólico vermelho amarelo	0.040	
(8) Terra roxa estruturada	0.011	Chaves, 1994

Uma vez que a maior parte das terras da bacia estudada apresenta alta vulnerabilidade à erosão, destaca-se a necessidade de atenção com relação à proteção com vegetação constante sobre os solos suscetíveis.

Fator LS

O mapa do fator LS (Figuras 17 A - SRTM; B - carta topográfica/referência) está apresentado com as classes determinadas a partir da metodologia utilizada por Silva e Schulz (2003) (Tabela 5, pág. 45). Valores inferiores a 1 indicam que o relevo atua como amenizador do processo erosivo, pois valores entre 0 e 0.99, quando multiplicados no modelo, diminuem o resultado da perda. Estes valores indicam áreas onde a deposição é maior que o carreamento de sedimentos. Enquanto que valores exatamente iguais a 1 participam de forma nula nos cálculos, por se tratar de um elemento neutro na multiplicação. Por outro lado, quando valores superiores a 1 são multiplicados, ocorre uma ampliação do valor final, mostrando uma participação cada vez maior do relevo na intensificação do processo erosivo à medida que ocorre o aumento do valor do fator LS (Silva e Schulz, 2003).

O mapa referência do fator LS - LS/referência (Figura 17 A) revelou que em 40,1% da área a deposição é maior que o carreamento de sedimentos [1], nestes locais concentram-se os sedimentos e a poluição carreados das partes a montante. Com isso, o cuidado deve ser intensificado nas porções mais altas, pois no manejo das culturas, são utilizados produtos químicos que contaminam as áreas de deposição que compõem zonas de recarga do aquífero Guarani (Zuquette, Palma e Pejon, 2009). No entanto, estas áreas [1] no LS/SRTM representam 26,9% da bacia, portanto o LS/SRTM apresentou maiores valores de LS do que o LS/referência em 12,9% da área.

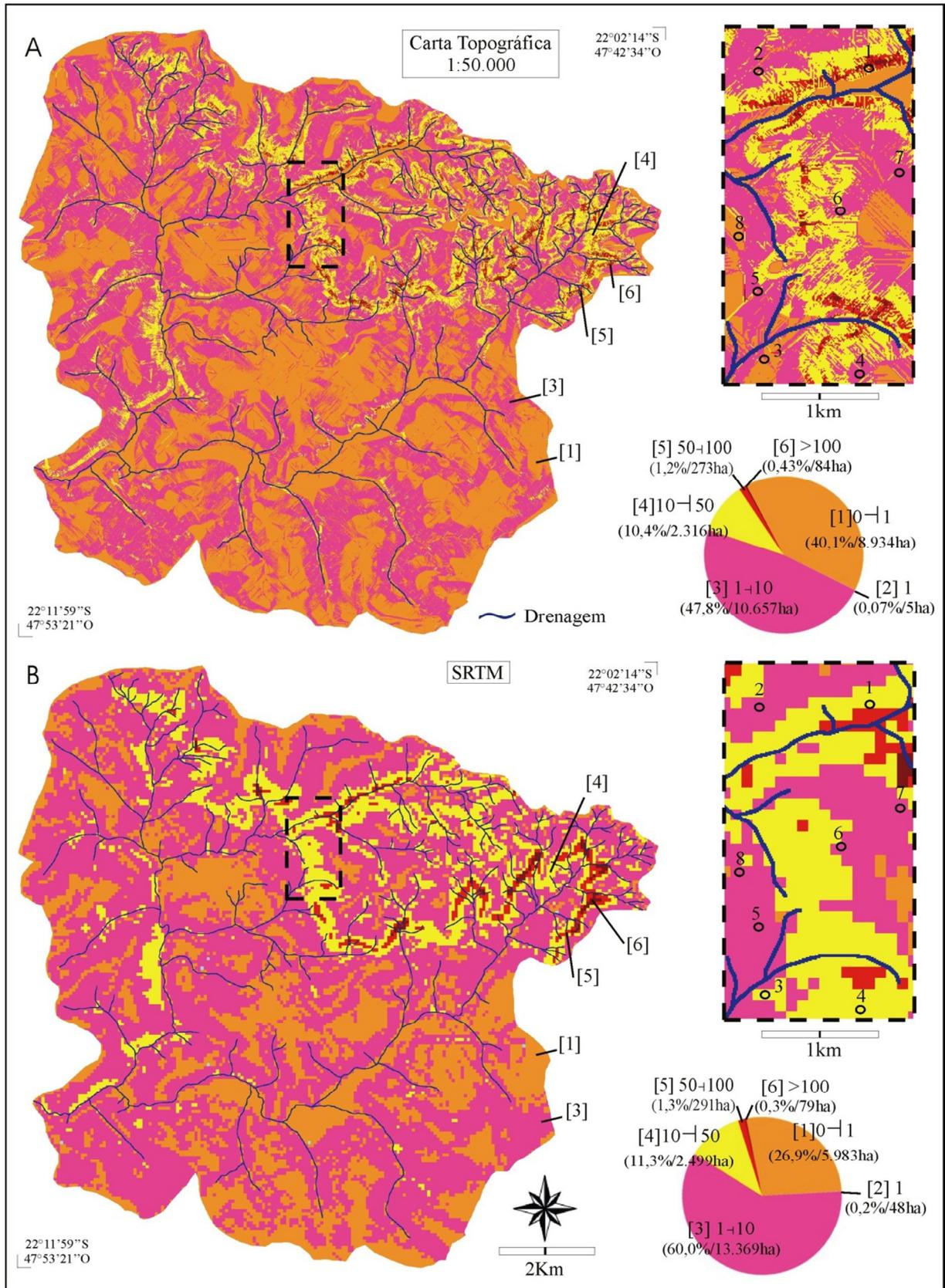


Figura 17 - Fator LS, a dimensional, A - SRTM e B - carta topográfica/referência 1:50.000.

Áreas onde a deposição é igual ao carreamento de sedimentos, representadas pela classe [2], equivalem a 0,02% no LS/referência e 0,35% no LS/SRTM. Já era esperado um valor baixo para esta classe por se tratar de uma classe com valor pontual.

A bacia apresenta declividades suaves em grande parte de suas áreas, por isso 47,9% das terras apareceram na classe [3] entre 1 e 10, no mapa referência, enquanto que no LS/SRTM 60,0% da área apareceu nesta classe. Tal fato indica conflito entre os dois mapas quando da constatação de uma diferença de 12,1% entre as mesmas classes dos dois mapas. A classe de LS [4] entre 10 e 50 no mapa referência aparece em 10,4% da bacia e no LS/SRTM em 11,2%, o que mostra a parcela de contribuição do fator topografia influenciando na perda de solo mais intensamente nas regiões das cabeceiras dos rios, principalmente na região das Cuestas Basálticas e nas porções mais altas da bacia.

As duas últimas classes do mapa do fator LS [5] e [6] aparecem em menos de 2% da bacia nos dois mapas, sendo que estas classes são verificadas nas porções compostas pelas Cuestas Basálticas, onde o terreno sofre grandes desníveis que formam paredões. Apesar de pequena contribuição espacial, ao longo desta formação, o escorregamento de sedimentos é facilitado pelas altas declividades, sendo, portanto, muito importante que essas áreas sejam cobertas por vegetação para permanecerem protegidas. As áreas das Cuestas devem ser tratadas com cuidado com relação à perda de solo por parte dos usuários, pois é onde estão localizadas as maiores declividades sobre Latossolo Vermelho Amarelo. As nascentes e cabeceiras dos rios, localizadas na porção nordeste da bacia, estão nas partes planas acima das Cuestas e também devem ser tratadas com manejo adequado, já que são utilizadas para a agricultura.

As porcentagens de áreas em cada classe adimensional do mapa do fator LS mantiveram-se praticamente constantes para os valores das classes [4], [5] e [6] do LS/referência e do LS/SRTM. Contudo fortes diferenças ocorreram nas classes [1] e [3]. Na classe [1] o LS/referência apresenta 40,1% da área enquanto que o LS/SRTM apresenta 26,9%. Em [3] LS/referência e LS/SRTM apresentam 47,8% e 60,0%, respectivamente. A variação dos valores de LS ficou restrita às classes [1] e [3]. Desta maneira, conclui-se que, da forma com que os resultados de estimativa de perda de solo são obtidos, onde as demais variáveis R, K e CP são constantes, a resolução do SRTM define os valores de estimativa de perda de solo.

Fator CP

Os valores de C, para este trabalho, foram encontrados na literatura (Tabela 10) e relacionados com o mapa de uso e cobertura do solo elaborado por Cunha et al. (2011) (Figura 18). Foi verificado em campo que existe pouca ou nenhuma prática conservacionista sendo aplicada nos locais com cultura na bacia, por isso adotou-se o valor de P igual a 1 para toda a área.

Tabela 10 - Fator C para as diferentes coberturas do solo.

Uso do solo	C	Fonte
{1} Mata ciliar	0.012	
{2} Urbano	0.001	Farinasso et al. (2006)
{3} Cerrado	0.042	
{4} Reflorestamento	0.001	Weill e Sparovek (2008)
{5} Solo exposto	1.000	Farinasso et al. (2006)
{6} Pasto	0.010	Oliveira et al. (2011)
{7} Cana-de-açúcar	0.3066	Weill e Sparovek (2008)
{8} Laranja	0.200	Pimenta (1998)
{9} Água	0.000	Oliveira et al. (2011)

O mapa de uso do solo mostra que 38% das áreas estão aproveitadas como pasto, seguido pela cultura de laranja em 13% e pelo solo exposto em 12% das terras. Cerradão e mata ciliar, áreas que protegem o manancial, estão em apenas 15% da bacia. Zonas de reflorestamento aparecem em 10% das áreas e áreas urbanas ocupam 4%. Apenas 25% da bacia possuem vegetação protegendo o solo contra a erosão e, portanto, os outros 75% estão utilizados quase sempre sem a observação de técnicas de preservação e conservação, promovendo a degradação dos recursos naturais. As pastagens, apesar de possuírem baixo valor de C, não protegem os solos contra o carreamento de nutrientes e poluição, além de apresentarem terreno compactado e favorecerem o surgimento de voçorocas e erosão por deslizamentos.

Nota-se que a bacia não é ocupada de forma a proteger os recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos, proteção que deveria ocorrer já que é uma bacia de manancial sobre o aquífero Guarani, importante recurso para o Brasil e países vizinhos. A ocupação com pasto, na maior parte das terras revela o desinteresse dos usuários com relação a uma ocupação com vistas nas aptidões da região. Uma bacia que possui importância para o abastecimento de água deveria ser ocupada de forma que os recursos hídricos fossem preservados e conservados para continuar abastecendo a população com água de qualidade.

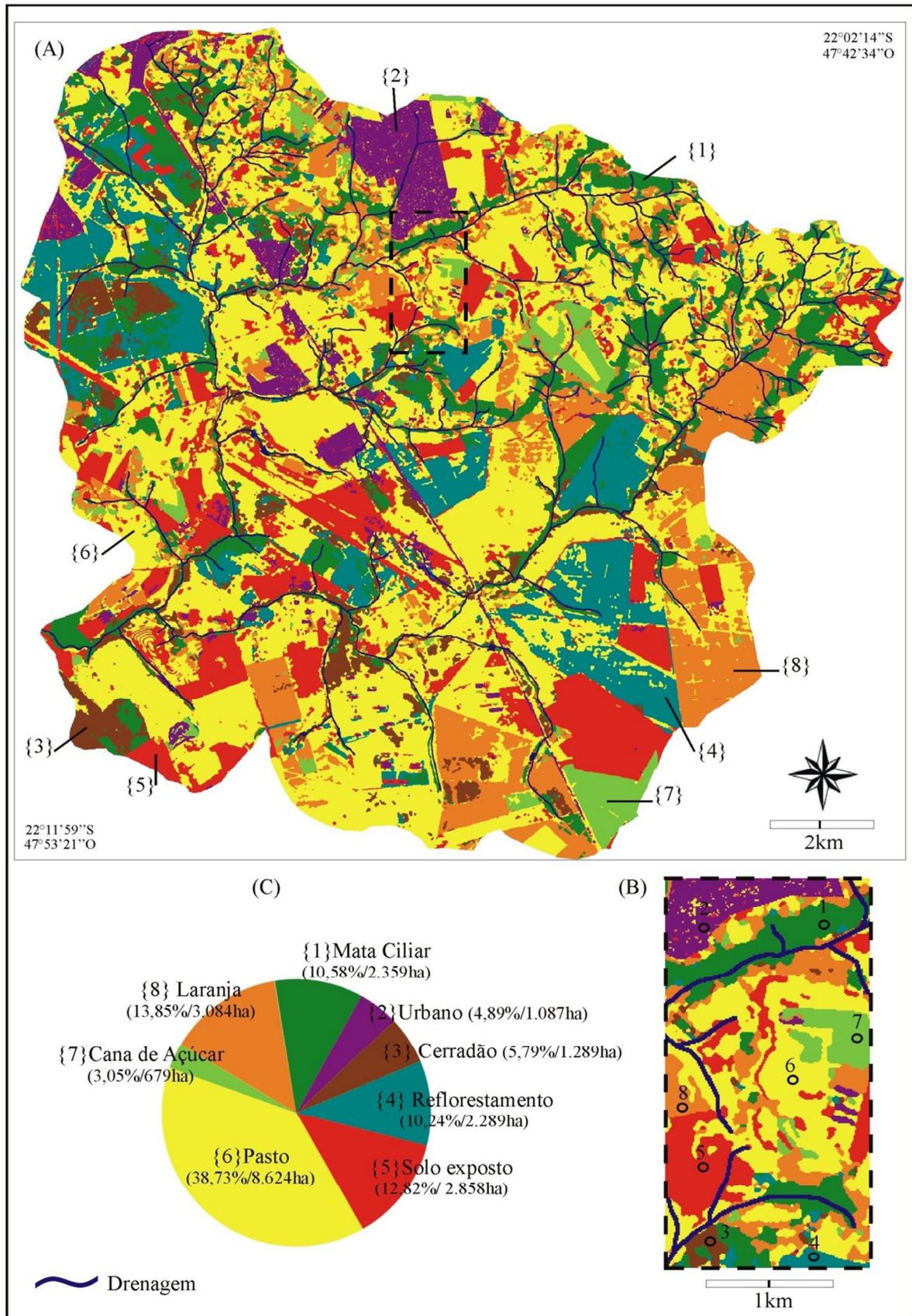


Figura 18 - Mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2006 e cada um dos temas identificados de 1 até 8 na ampliação (Fonte: Cunha et al., 2011).

Estimativa de Perda de Solo

Para a determinação da estimativa de perda de solo, os fatores foram multiplicados entre si para compor o modelo multiplicativo simples da EUPS. Primeiramente, foram multiplicados os fatores erosividade da chuva, erodibilidade do solo e topografia para as duas resoluções, carta topográfica em escala 1:50.000 e SRTM com resolução de aproximadamente 90m, para se obter os dois mapas de potencial natural de erosão - PNE (Figura 19 A e B), em seguida, os PNE/referência e o PNE/SRTM foram multiplicados pelo fator cobertura do solo para gerar os mapas de estimativa de perda de solo - EPS/referência e EPS/SRTM (Figura 20 A e B).

O resultado obtido para potencial natural de erosão foi dividido em quatro classes (Tabela 11), conforme indicado por Silva e Santos (2008) de acordo com a Tabela 6 (pág. 46). Observa-se que 71,2% no PNE/referência e 63,0% PNE/SRTM apresentam muito baixa ou baixa susceptibilidade natural à erosão, o que evidencia que a cobertura do solo influencia muito nos altos valores de perda resultantes.

Os resultados para EPS (Tabela 12), considerando o fator CP cobertura do solo, estão apresentados conforme escala de Irvem et al. (2007) (Tabela 7, pág. 47). A partir deste resultado observou-se que o mapa de estimativa de perda de solo gerado a partir do MDT/SRTM - EPS/SRTM (Figura 20 B) apresenta em 38,9% de suas áreas muito baixa perda de solo, enquanto que o mapa utilizado como referência (Figura 20 A) mostra 45,3% da bacia com muito baixa perda de solo. Neste mapa também ocorreu a unificação das classes mais altas vermelha e amarela em diversos pontos do mapa. Fato possível de ser observado na ampliação da Figura 20 B, quando ocorre a diminuição classe "1" para que exista ampliação das demais classes.

Visualmente nota-se nas Figuras 19 A e B que a resolução oferecida pelo MDT/SRTM não permite uma boa definição ao longo das fronteiras entre as classes no PNE/SRTM. Na porção nordeste da bacia, onde estão as maiores elevações e desníveis devido à presença das Cuestas, a definição grosseira do MDT/SRTM prejudicou o resultado aumentando o tamanho das áreas das classes *3* moderada e *4* extremamente severa. Isto pode ser observado na ampliação da Figura 19 B às margens da drenagem na porção norte. Enquanto que no PNE/referência existe um fragmento de classe *1*, muito baixo potencial natural de erosão, no PNE/SRTM a classe *4* aparece unificada continuamente entre a margem norte e margem sul da mesma drenagem.

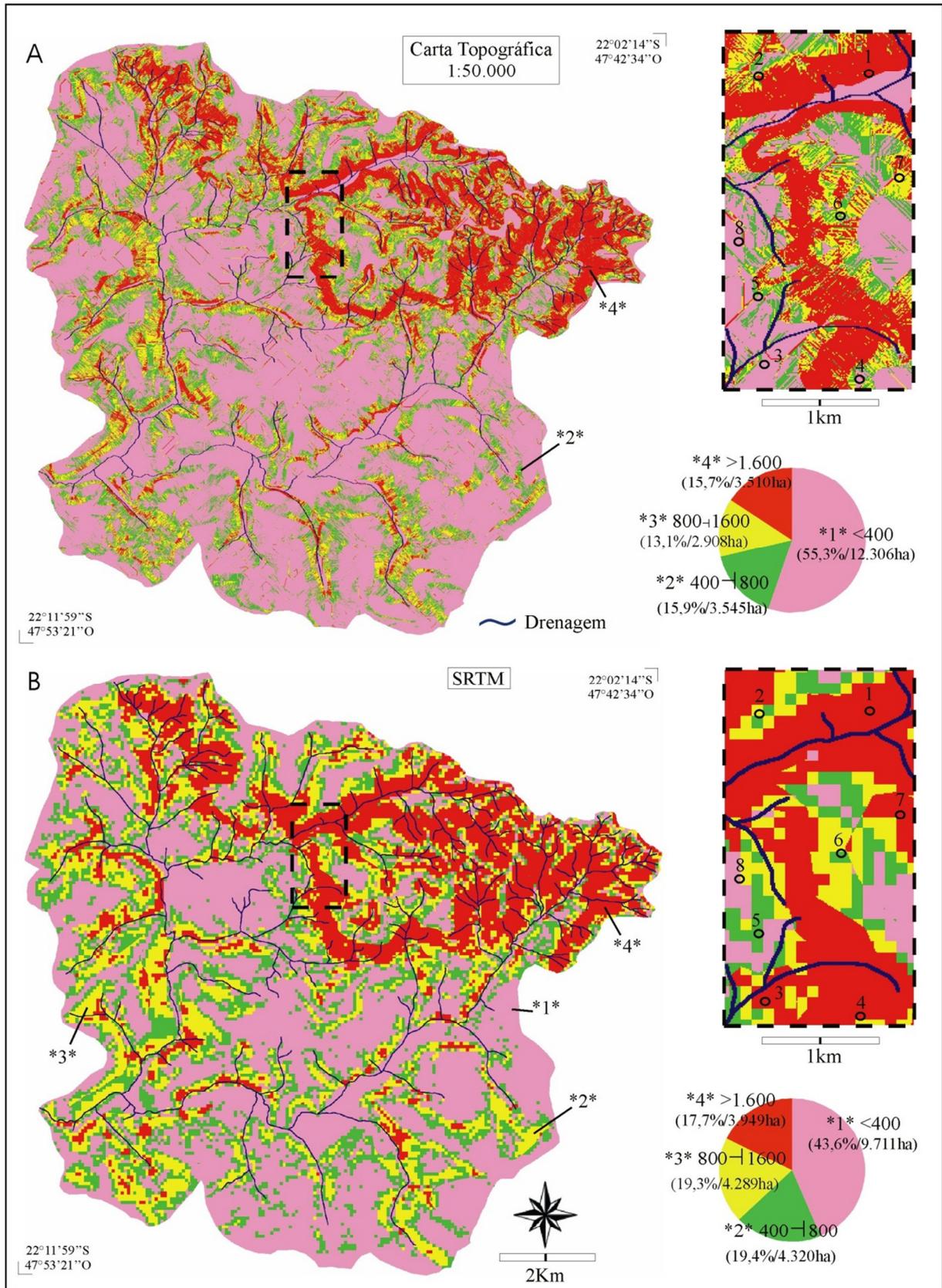


Figura 19 - Potencial Natural de Erosão em ton/ha/ano. A - PNE/referência; B - PNE/SRTM.

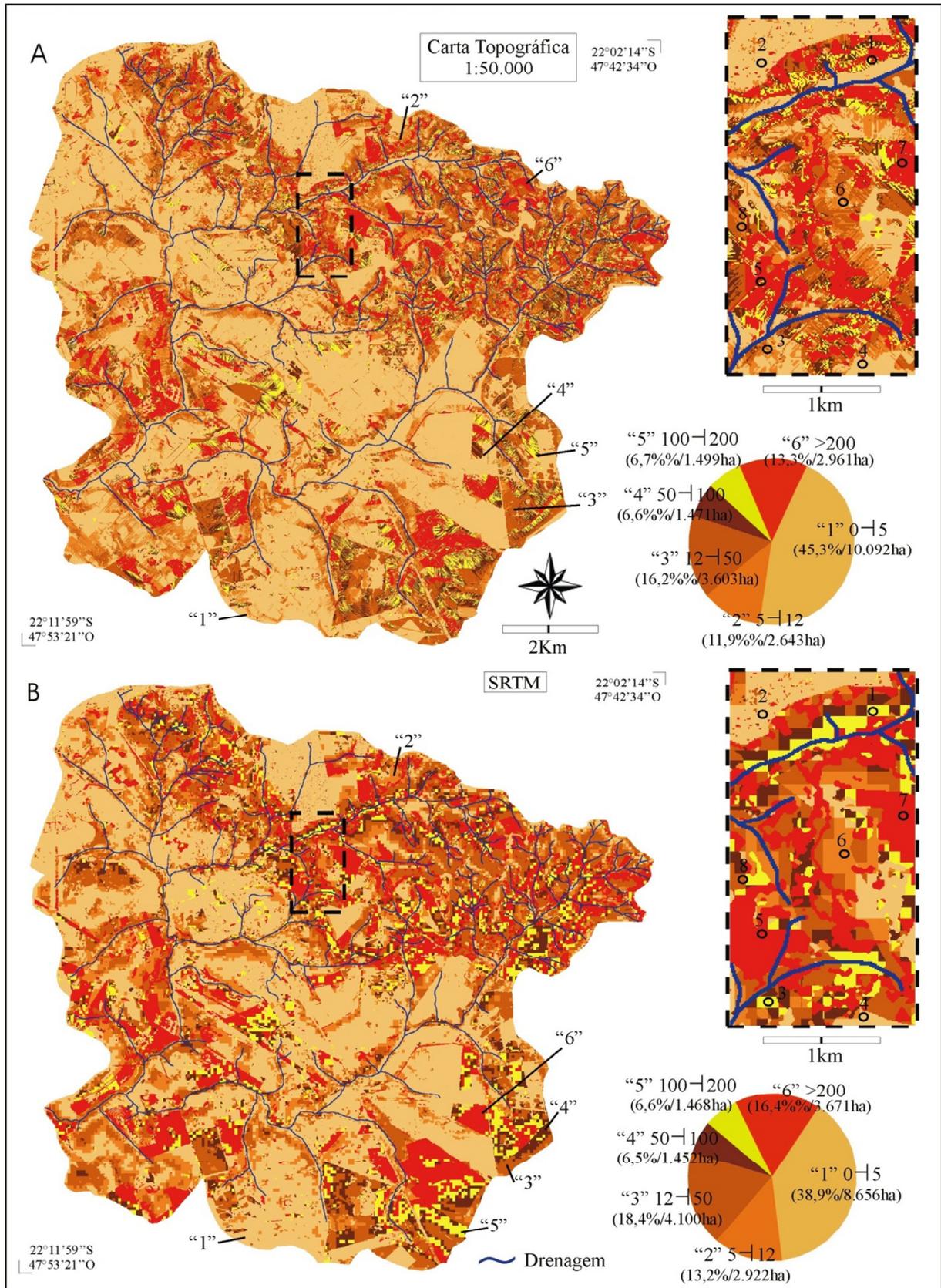


Figura 20 - Estimativa de Perda de solo em ton/ha/ano. A - EPS/referência; B - EPS/SRTM.

Tabela 11 - Síntese dos resultados para PNE.

Classes de PNE ton/ha/ano		*1*	*2*	*3*	*4*
		< 400	400 800	800 1.600	> 1.600
Interpretação		Muito baixo	Baixo	Moderado	Extremamente Severo
PNE/referência	%	55,3	15,9	13,1	15,7
	ha	12.306	3.545	2.908	3.510
PNE/SRTM	%	43,6	19,4	19,3	17,7
	ha	9.711	4.320	4.289	3.948

Fonte: Silva e Santos (2008).

Tabela 12 - Síntese dos resultados para EPS.

Classes de EPS ton/ha/ano		“1”	“2”	“3”	“4”	“5”	“6”
		0 5	5 12	12 50	50 100	100 200	> 200
Interpretação		Muito baixa	Baixa	Moderada	Severa	Muito severa	Extremamente severa
EPS/ referência	%	45,3	11,9	16,2	6,6	6,7	13,3
	ha	10.092	2.643	3.603	1.471	1.499	2.961
EPS/SRTM	%	38,9	13,2	18,4	6,5	6,6	16,4
	ha	8.656	2.922	4.100	1.452	1.468	3.671

Fonte: Irvem et al. (2007).

Além disso, os pontos de 1 a 8 nas ampliações mostram que, à exceção dos pontos 3 e 4, todos os pontos apresentam informação de PNE em conformidade com o mapa tomado como referência; contudo, o tamanho das áreas das classes mais elevadas sofreram aumento devido à resolução do sensor. No restante da bacia hidrográfica, apesar do relevo mais suave, o PNE/SRTM em comparação com o PNE/referência apresenta contornos abruptos da classe vermelha extremamente severa e nítida ampliação da classe *3* amarela.

Entretanto, 26,6% das áreas do mapa referência e 29,5% das áreas do EPS/SRTM apresentam estimativa de perda de solo severa, muito severa ou extremamente severa. Isto significa que mais de um quarto da bacia está sob risco de erosão acima do que deveria. Percebe-se que as classes com as maiores estimativas de perda de solo são maiores no EPS/SRTM, sendo que tal fato é consequência da ampliação do tamanho das classes mais altas no mapa PNE/SRTM.

A resolução mais grosseira do MDT/SRTM conduziu a uma ampliação das áreas de maior declividade desde o mapa do fator LS. Como foram gerados a partir do mapa do fator LS os mapas PNE e EPS também tiveram suas classes maiores aumentadas.

As Figuras 21 e 22 mostram a ampliação dos resultados feita de forma a selecionar um ponto de cada tema do mapa de ocupação e, Com isso, observar a variação dos resultados para as diferentes coberturas do solo. Os pontos escolhidos estão indicados nos

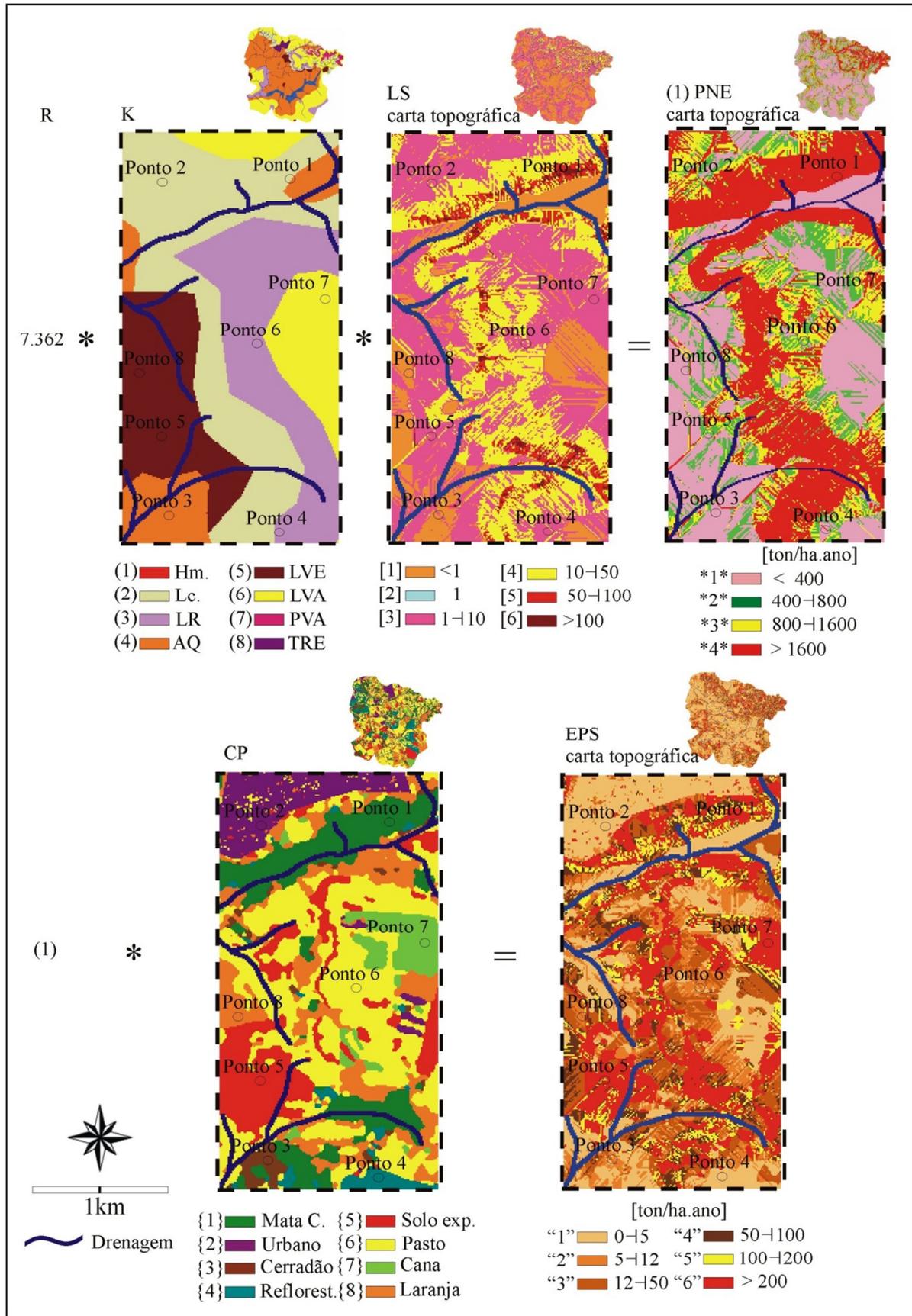


Figura 21 - Áreas ampliadas de cada mapa para os dados do MDT/referência 1: 50.000.

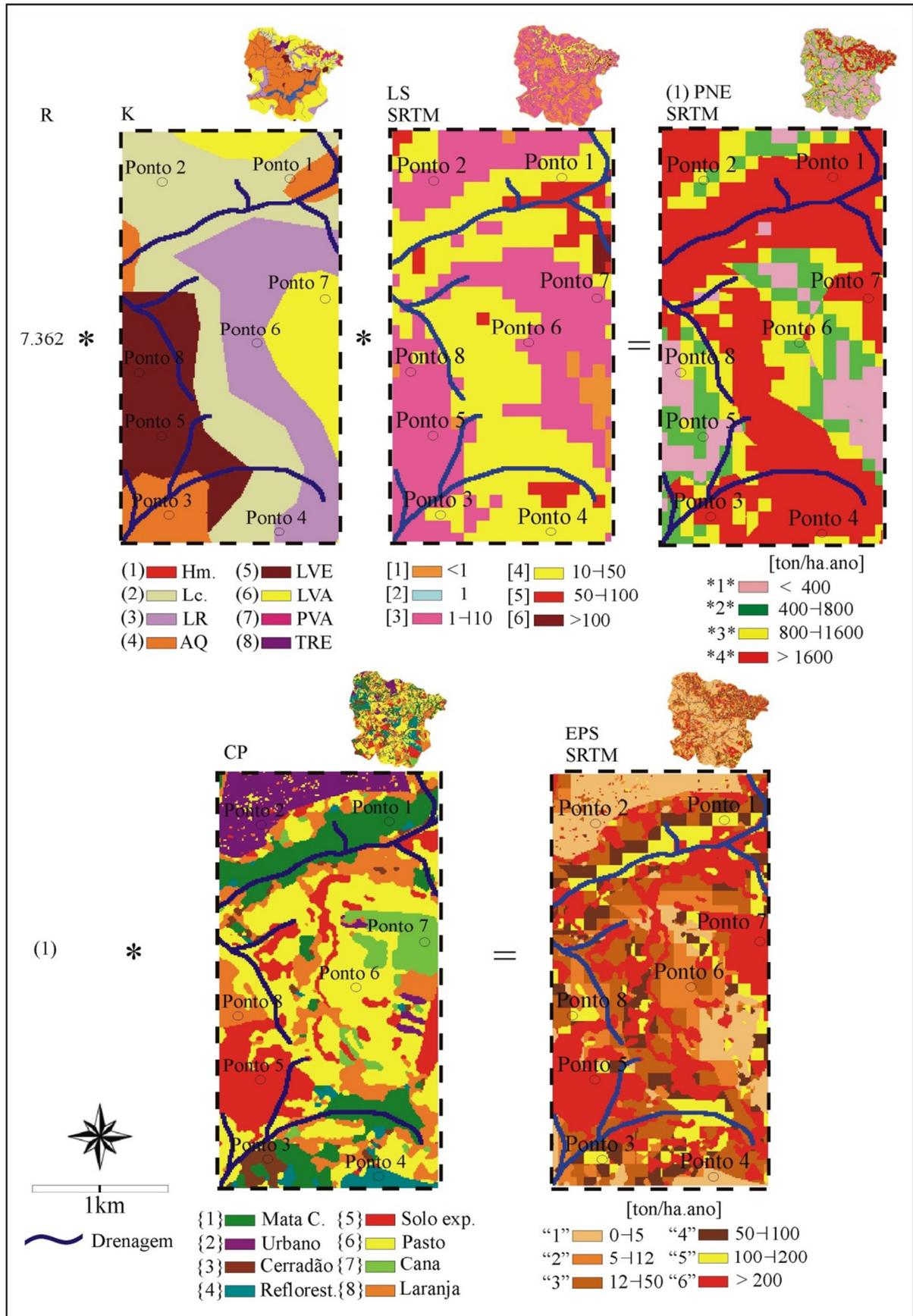


Figura 22 - Áreas ampliadas de cada mapa para os dados do MDT/SRTM.

recortes e os valores aplicados em cada mapa estão apresentados na Tabela 13. Nestas análises considerou-se o fator LS como o principal valor, já que as diferentes resoluções do MDT/referência e MDT/SRTM conduziram, primeiramente, a resultados diferentes para o LS.

Tabela 13 - Valores encontrados para os fatores da EUPS e seus resultados para os 8 pontos destacados nas ampliações.

Fator		R	K	LS referência/ SRTM	PNE referência/ SRTM	CP	EPS referência/ SRTM
Uso e Cobertura	unidades	Mega Joule. mm/ha/h/ano	t.ha.h/ha. MJ.mm	Adim.	ton/ha/ano	Adim.	ton/ha/ano
{1} Mata Ciliar		7.362	0,032	69,39/ 80,65	1.6347,17/ 1.8988,07	0,012	196,16/ 227,99
{2} Urbano		7.362	0,04	46,66/ 7,11	13.740,44/ 2.090,80	0,001	13,74/ 2,09
{3} Cerradão		7.362	0,032	0,68/ 6,76	160,19/ 1.592,54	0,042	6,72/ 66,88
{4} Reflorestamento		7.362	0,013	1,94/ 8,36	185,66/ 800,10	0,001	0,18/ 0,80
{5} Solo exposto		7.362	0,014	4,56/ 5,14	469,99/ 529,76	1	469,99/ 529,76
{6} Pasto		7.362	0,013	29,71/ 13,72	2.843,42/ 1.313,08	0,01	28,43/ 13,13
{7} Cana		7.362	0,032	4,84/ 6,13	1.140,22/ 1.444,13	0,3066	349,59/ 442,77
{8} Laranja		7.362	0,014	1,43/ 3,52	147,38/ 362,79	0,2	29,47/ 72,55

O ponto 1, correspondente à mata ciliar sobre Areia Quartzosa, apresenta valor de LS alto, indicando que o relevo exerce influência positiva na perda de solo; os valores para PNE são altos, porém os valores para EPS são reduzidos pela presença da mata ciliar; contudo, continuam sendo valores altos para perda de solo. Neste ponto, o valor de LS/SRTM foi mais alto do que no LS/referência, o que conduz a uma diferença de aproximadamente 16% no resultado para estimativa de perda de solo. Certamente, se a bacia hidrográfica estudada fosse composta apenas por relevo acidentado, a superestimativa representaria maiores diferenças no resultado final. Contudo, para esta bacia, valores de LS em [4], [5] ou [6] representam apenas 12,8% da área total.

O ponto 2 corresponde à zona urbana sobre solo Litólico e relevo acentuado, com alto valor para PNE devido ao valor de LS; porém, valores para EPS foram reduzidos pela presença da área urbanizada. O valor de LS/SRTM com relação ao LS/referência foi reduzido, no ponto 2, em aproximadamente 6,6 vezes, fato que conduziu a uma significativa redução no resultado de estimativa de perda de solo. Esta diferença também pode ser explicada pela

menor resolução do sensor. O ponto 3 também está sobre Areia Quartzosa, porém sobre vegetação do tipo cerradão, que representa algum remanescente da vegetação natural do local sob forte pressão da expansão urbana na região. Este ponto possui valor de LS < 1 no mapa referência e 6,76 no mapa LS/SRTM e, com isso, apresenta grande diferença no valor encontrado para PNE nos dois mapas; no entanto, os valores de EPS são baixos devido à presença de vegetação protegendo o solo com consequente diminuição dos valores.

O ponto 4 se refere à cobertura reflorestamento e está sobre Latossolo Roxo, possui LS entre 1 e 10 nos dois mapas e valores de estimativa de perda de solo bem parecidos e reduzidos devido à presença de vegetação. O ponto 5 mostra a ocorrência de solo exposto sobre Latossolo Vermelho Escuro, apesar de baixos valores de LS, os valores de EPS são altos devido à ausência de vegetação. O ponto 6 se refere ao uso mais frequente na bacia, a ocorrência de pastos, sobre Latossolo Roxo e LS médio apresenta valores baixos de EPS, pois a pastagem mantém o solo coberto, porém não previne compactação por pisoteamento animal, diminuição da biodiversidade e risco de erosão por deslizamento. O ponto 7 traz a cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho Amarelo, solo com alta vulnerabilidade e valores de LS relativamente baixos, porém a cana sobre este solo sem a observação de técnicas preservacionistas elevou os valores encontrados de EPS. O ponto 8 corresponde à cultura de laranja, comum na região, sobre Latossolo Vermelho Escuro, solo com menos vulnerabilidade, porém menor ocorrência na bacia. Neste ponto os valores de LS foram baixos resultando em baixos valores de PNE e EPS; no entanto, a cultura de laranja sem a observação de técnicas conservacionistas pode conduzir a altos valores de perda de solo quando associada a altos valores de LS.

As grandes perdas encontradas estão relacionadas aos usos do solo para a agricultura, sendo que os pontos 5 e 7, solo exposto e cana-de-açúcar, respectivamente, são os que correspondem aos maiores valores de EPS encontrados, porém não são os que apresentam maiores valores de PNE, revelando que o uso do solo conduziu às grandes perdas.

Análise da influência de cada fator sobre a estimativa de perda de solo

Com o intuito de identificar as classes de cada fator que mais influenciaram nos maiores valores encontrados para estimativa de perda de solo, os fatores K, LS e C foram multiplicados pelos valores de estimativa de perda de solo maiores que 100 ton/ha/ano. Este

cruzamento foi feito com as perdas encontradas pelo mapa EPS/referência e pelo mapa EPS/SRTM.

O mapa pedológico, ou fator K, foi cruzado com o EPS/referência e com o EPS/SRTM, considerando somente os valores de perda maiores que 100 ton/ha/ano. Os gráficos com os resultados estão apresentados na Figura 23. Para o EPS/referência a área da bacia que compõe as perdas maiores que 100 ton/ha/ano corresponde a 4.461ha enquanto que para o EPS/SRTM essa área é de 5.135ha.

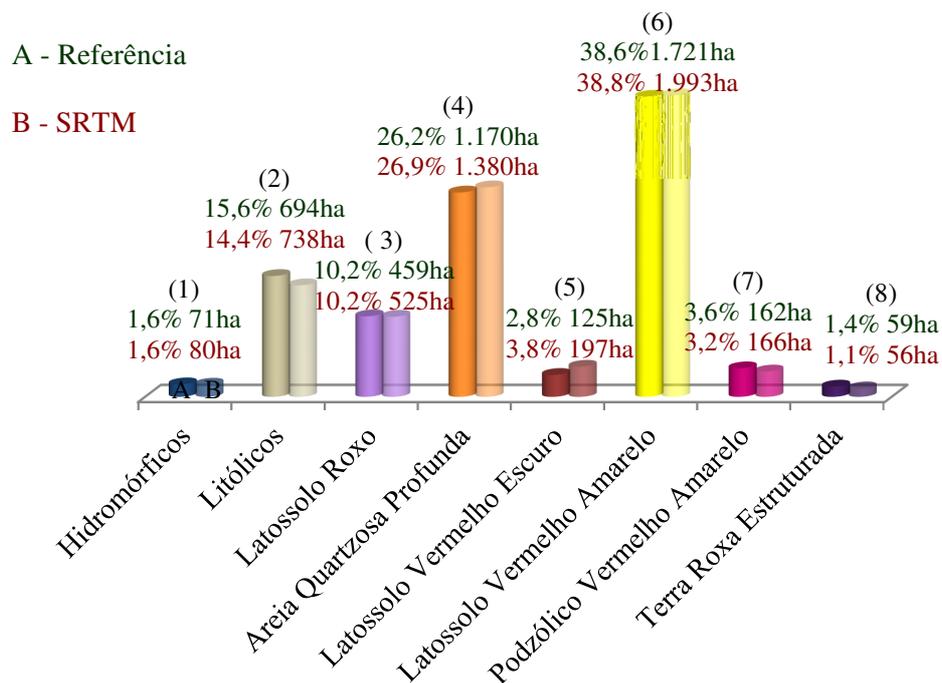


Figura 23 - Gráfico da relação entre o mapa pedológico e o EPS/referência e o EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.

O cruzamento do mapa pedológico com os maiores valores de EPS revelou que o Latossolo Vermelho Amarelo (6), tema amarelo, está presente em 38,6% dos grandes valores de perda encontrados no EPS/referência. Enquanto que as Areias Quartzosas (4), tema laranja, apareceram em 26,2%, resultado que se explica pela alta frequência e alta susceptibilidade à erosão dos dois tipos de solos. Os resultados para o cruzamento do mapa pedológico com os valores maiores que 100 ton/ha/ano encontrados no EPS/referência e no o EPS/SRTM mostraram porcentagens em temas parecidas, porém com alcances diferentes, o EPS/SRTM apresentou altas perdas em 674 ha a mais do que o EPS/referência. Isto ocorreu devido ao fato do LS/SRTM ter apresentado ampliação das classes mais altas sobre as mais baixas.

A análise da influência das classes do fator LS revelou que tanto na comparação com o EPS/referência como na comparação com EPS/SRTM a classe entre 1-10 está

presente na maior parte dos locais identificados com altas perdas devido à grande frequência desta classe na bacia em estudo (Figura 24).

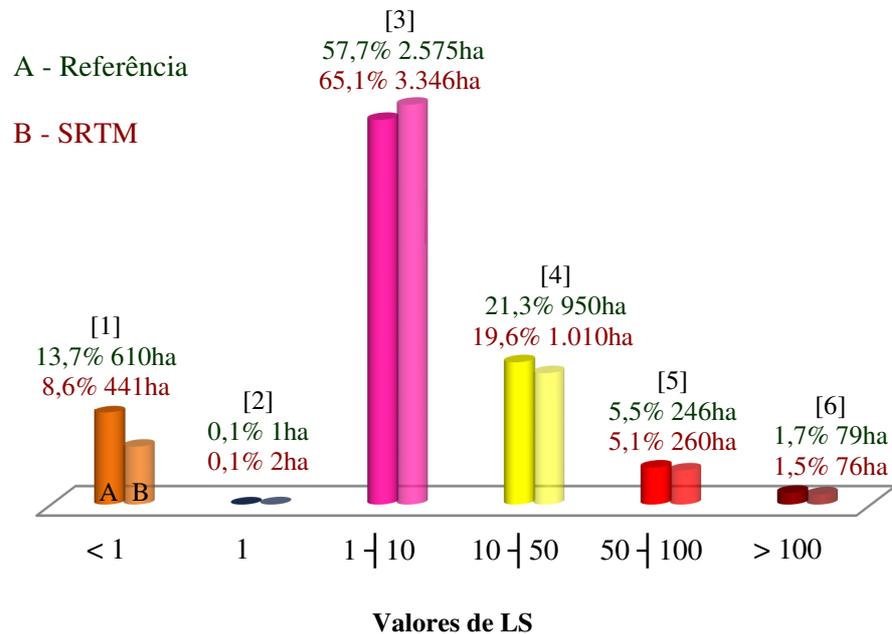


Figura 24 - Gráfico da relação entre as classes do mapa do fator LS/referência e LS/SRTM com o EPS/referência e o EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.

Nas zonas planas, não é a topografia que contribui com valores elevados, já que estes são os valores mais baixos de LS. As duas últimas classes do mapa do fator LS aparecem em menos de 2% da bacia, porém em 7,2% das perdas mais altas no EPS/referência e 6,6% no EPS/SRTM, com maior ocorrência na região das Cuestas onde o relevo é acentuado.

Com relação ao fator CP, tanto na comparação com o EPS/referência como com o EPS/SRTM (Figura 25), o solo exposto é a classe predominante, aparecendo em torno de 50% das estimativas de perdas maiores do que 100ton/ha/ano, em seguida estão as culturas de laranja e cana-de-açúcar, que somadas estão em 38% das áreas com as maiores perdas na comparação com o EPS/referência.

O solo exposto ocorre durante um período das culturas, quando a cobertura antiga foi retirada e a nova ainda não foi plantada, revelando práticas inadequadas de manejo do solo que acarretam em grande perda de solo e dos recursos disponíveis para os próprios usuários ou ainda nos locais utilizados para mineração. Com isso, é possível concluir que existe a necessidade de maior atenção com relação à utilização adequada da bacia, com vistas à manutenção da qualidade e quantidade de água do manancial.

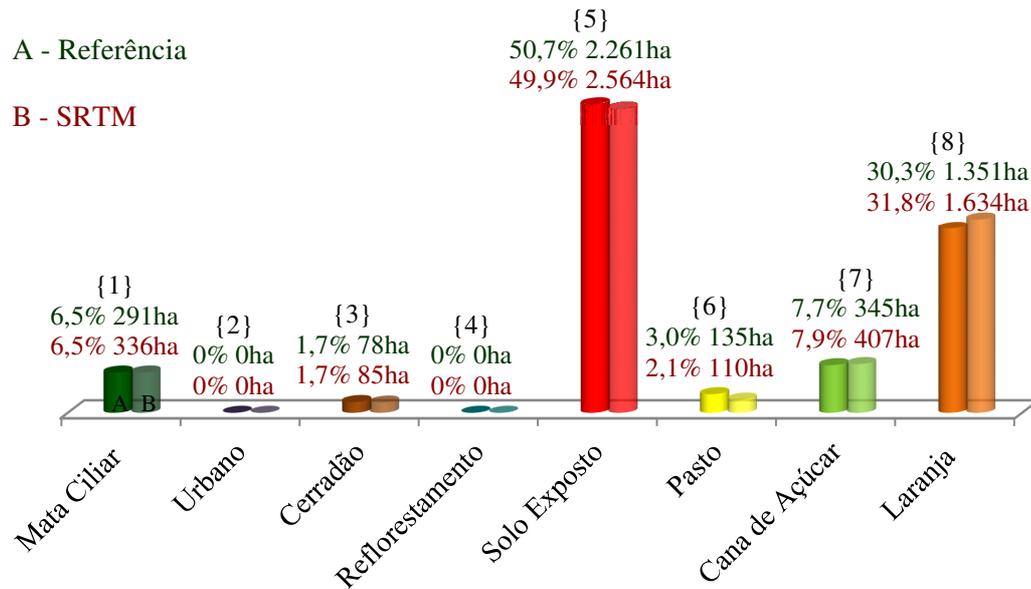


Figura 25 - Gráfico da relação entre os tipos de uso e os mapas EPS/referência e EPS/SRTM > 100 ton/ha/ano.

O mapa de uso do solo (Figura 18, pág. 56) indica 38% da bacia coberta por pasto, 17% da área ocupada com cultura de cana e laranja e 12% com solo exposto, estes usos estão relacionados às atividades econômicas e são responsáveis pelos altos valores de estimativa de perda de solo encontrados. Destaca-se a presença de solo exposto às margens de cursos d'água, fato que compromete a qualidade dos mananciais, já que esses são extremamente susceptíveis à ação da erosão em suas margens. Há, ainda, o agravante do plantio não ser efetuado considerando-se a aplicação de práticas conservacionistas, o que implica em maior risco quanto aos processos erosivos (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

Somadas, as áreas cobertas com pasto, cana, laranja e solo exposto representam 90% das perdas maiores do que 100ton/ha/ano. Com isso, verifica-se que quase a totalidade das altas perdas encontradas na bacia está relacionada às atividades do agronegócio (culturas e pastagens). Esse fato revela que as atividades produtivas estão sendo desenvolvidas sem a manutenção dos recursos naturais da região.

Desta forma, destaca-se a grande importância da maneira como o solo é manejado por parte dos usuários da bacia. Como são muitas variáveis envolvidas na estimativa de perda de solo, porém, dentre elas, apenas o uso do solo pelo homem pode ser alterado, toda a ocupação antrópica deveria ser baseada no planejamento e na busca de uma ocupação consciente, para, com isso, desfrutar de benefícios da ocupação e não malefícios de um uso do solo destrutivo.

Matrizes de Erro e Índice Kappa

Neste estudo a utilização do MDT/SRTM foi comparada com a utilização do MDT/referência proveniente dos dados de maior resolução da carta topográfica do IBGE em escala 1:50.000. Esta comparação foi feita, pois, os dados do modelo digital do terreno provenientes da SRTM serem a fonte mais acessível de informação topográfica para aplicação em modelos em escalas global e regional (Vente et al., 2009). No entanto, a resolução mais grosseira dos dados do MDT/SRTM faz com que os dados nem sempre possam ser utilizados com precisão na aplicação de modelos em sistemas de informação geográficas.

Neste item estão apresentadas as matrizes de confusão ou matrizes de erro para os mapas gerados a partir das duas fontes diferentes de dados topográficos. Foram geradas matrizes de erro para a comparação dos mapas hipsométricos, dos mapas do fator LS, dos mapas de PNE e dos mapas de EPS. As matrizes contêm as informações de cada classe de cada mapa e sua correspondência com os dados dos mapas tomados como referência.

Os dois mapas hipsométricos estão apresentados na Figura 26 e a matriz de erro destes mapas na Tabela 14. Através desta matriz é possível notar que os erros observados estão sempre presentes nas classes subsequentes, o que é explicado pela continuidade dos dados contidos neste mapa. Ainda pela matriz, nota-se que o total de pixels alocados em classes diferentes corresponde a 27,26%, ou seja, quase um terço dos pixels apareceu em classes diferentes do mapa referência. Porém o índice Kappa encontrado para os hipsométricos foi de 0.6594 que, de acordo com Landis e Kock (1977) (Tabela 8, pág. 49), trata-se de uma concordância substancial entre os dois mapas, revelando que o hipsométrico/SRTM pode ser fonte de dados altimétricos com razoável confiança.

Tabela 14 - Matriz de erro para os mapas hipsométrico/referência e hipsométrico/SRTM.

Referência	1	2	3	4	5	6	7	8	Kappa 0,6594	
SRTM									total	Erro C
1	28233	4286	0	0	0	0	0	0	32519	0,1318
2	16109	253218	15380	0	0	0	0	0	284707	0,1106
3	5	123610	583868	12063	0	0	0	0	719546	0,1886
4	0	0	162346	348996	19719	225	0	0	531286	0,3431
5	0	0	1339	84733	109830	12126	687	0	208715	0,4738
6	0	0	23	5090	44006	75737	13577	102	138535	0,4533
7	0	0	0	147	3073	49252	148444	14024	214940	0,3094
8	0	0	0	0	214	1498	28720	85476	115908	0,2626
total	44347	381114	762956	451029	176842	138838	191428	99602	2246156	
Erro O	0,3634	0,3356	0,2347	0,2262	0,3789	0,4545	0,2245	0,1418	27,26%	

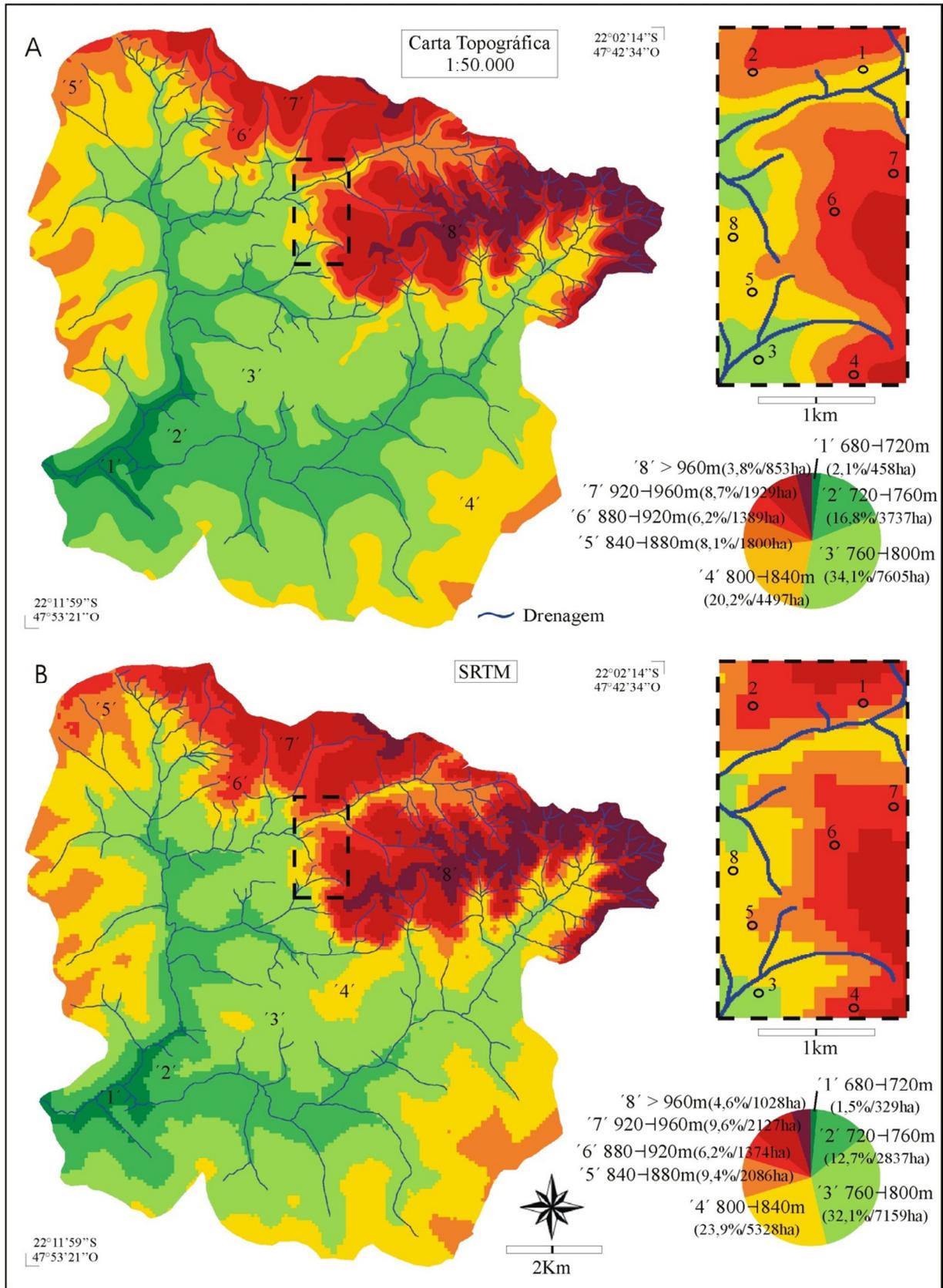


Figura 26 - Mapas hipsométricos, A - referência; B - SRTM.

As diferenças encontradas entre os mapas do fator LS, de acordo com a matriz de confusão (Tabela 15), estão nas classes com valores <1 e entre $1-10$; no LS/SRTM valores entre 1 e 10 são mais abundantes em 12% da área, enquanto que no mapa referência, valores menores que 1 são mais abundantes em 12% da área. Esse fato mostra que existe uma confusão entre essas duas classes. Apesar destas duas classes não serem subjacentes, podem ser tratadas como, pois a classe entre elas é pontual, com poucos pixels, em ambos os mapas.

Tabela 15 - Matriz de erro para os mapas LS/referência e LS/SRTM.

Referência	1	2	3	4	5	6	Kappa 0,2584	
SRTM							total	Erro C
1	407145	209	192259	11055	525	324	611517	0,3342
2	432	0	293	11	2	0	738	1
3	459889	346	758854	117417	6635	2207	1345348	0,4359
4	29692	15	116173	88053	13854	3924	251711	0,6502
5	3516	2	5845	13468	4736	1320	28887	0,8361
6	449	0	1296	3687	1841	682	7955	0,9143
Total	901123	572	1074720	233691	27593	8457	2246156	
Erro O	0,5482	1	0,2939	0,6232	0,8284	0,9194		43,93%

Para o fator LS, o índice Kappa encontrado foi de 0,2584 que, segundo Landis e Koch (1977) (Tabela 8, pág. 49), é interpretado como de baixa precisão. Pela matriz de erro, pode-se notar que a discrepância geral (erros de omissão e de comissão) observada entre o LS/SRTM e o mapa referência foi de 43,93%, significando que esta quantidade de pixels do mapa avaliado está alocada em classes diferentes do mapa referência. É importante ressaltar que esta análise trata dados gerados de forma totalmente independente (carta topográfica e MDT/SRTM) e que, portanto, a coincidência entre os pixels do mapa analisado e o mapa referência é um forte indício de que a informação pode ser verdadeira. Porém, a discrepância entre os pixels dos mapas não significa necessariamente que a informação seja irreal, pois o mapa referência também não está livre de erros (Foody, 2009). Para tanto, é necessário analisar outras características dos mapas, como resolução espacial e metodologia de geração dos dados.

Nesta matriz as classes que possuem menor número total de pixels são também as classes que apresentam os maiores erros de omissão e de comissão, enquanto que as classes que possuem maiores quantidades de pixels apresentam os menores valores de erros. Por se tratar de uma avaliação de dados gerados de forma independente, isso pode ser explicado pela

amplitude das classes. Quanto maior a amplitude da classe, mais pixels ela é capaz de agrupar e desta forma, maiores são as chances desses pixels coincidirem com os do mapa referência.

O mapa do PNE gerado a partir do MDT/SRTM - PNE/SRTM apresenta erro em 50,27% dos pixels (Tabela 16), revelando que mais da metade dos pixels estão presentes em classes diferentes das encontradas no mapa referência. Percebe-se que a maior parte dos erros pode ser encontrada nas classes seguintes, mostrando que existe uma confusão entre as classes próximas. Tal fato pode ocorrer devido à arbitrariedade com que os limites entre as classes são definidos, sendo que as pequenas diferenças entre os dois mapas acabam por fazer com que pixels com valores próximos sejam alocados em classes imediatas.

Tabela 16 - Matriz de erro para os mapas de PNE/referência e PNE/SRTM.

Referência	1	2	3	4	Kappa	0,2582
SRTM					total	Erro C
1	738846	125958	62197	37328	964329	0,2338
2	241728	87662	64159	39944	433493	0,7978
3	173253	90084	91971	78298	433606	0,7879
4	87458	53985	74754	198531	414728	0,5213
Total	1241285	357689	293081	354101	2246156	
Erro O	0,4048	0,7549	0,6862	0,4393		50,27%

O índice Kappa encontrado para o PNE foi de 0,2582, e, de acordo com Landis e Kock (1977) (Tabela 8, pág. 49), o mapa gerado pode ser considerado razoável, já que este valor coincide com o encontrado para o fator LS, revelando que os fatores R e K (que foram multiplicados ao LS) não influenciaram nas diferenças e semelhanças entre os mapas.

Com relação aos mapas de EPS, a matriz de confusão (Tabela 17) mostra que 43,38% dos pixels do EPS/SRTM estão alocados em classes diferentes do mapa referência.

Tabela 17 - Matriz de erro para os mapas EPS/referência e EPS/SRTM.

Referência	1	2	3	4	5	6	Kappa	0,4199
SRTM							total	Erro C
1	748159	78539	39128	4488	1849	1131	873294	0,1433
2	147175	77881	58895	7321	2595	1001	294868	0,7359
3	98384	87743	152152	40813	21787	12604	413483	0,6323
4	10932	11494	49766	30386	25210	18777	146565	0,7927
5	6337	5590	31873	30079	36232	38291	148402	0,7559
6	6876	5265	31689	35242	63429	227043	369544	0,3856
Total	1017863	266512	363503	148329	151102	298847	2246156	
Erro O	0,2652	0,7078	0,5814	0,7951	0,7602	0,2403		43,38%

Nesta matriz as classes com menores quantidades de pixels não levaram a maiores valores de erros, talvez por não se tratar de amplitudes de classes tão diferentes como no mapa do fator LS. O índice Kappa obtido para os mapas de EPS foi de 0,4199 e pode ser interpretado como moderado, segundo Landis e Koch (1977) (Tabela 8, pág. 49), indicando que o uso do MDT/SRTM para esta análise fornece resultados razoáveis.

Os mapas de EPS foram gerados considerando a cobertura e, portanto, gerados de forma dependente. Uma vez que o mesmo mapa de uso e ocupação foi utilizado para gerar os dois mapas de perda de solo e, que valores similares podem ser encontrados nos dois mapas de perda natural, conclui-se que os dois mapas de EPS passaram a apresentar mais informações semelhantes entre si. Desta forma, as informações de uso e ocupação do solo influenciaram nos mapas finais de estimativa de perda de solo no sentido de deixá-los mais semelhantes, conduzindo a um valor de Kappa maior, em relação às outras análises, excetuando-se a dos hipsométricos.

Por se tratar de uma região relativamente plana, o fator topográfico não influencia tanto quanto o fator cobertura do solo, sendo este último o fator determinante no resultado da estimativa de perda de solo. Então a resolução mais grosseira do MDT/SRTM para esta bacia não influenciou de forma a alterar em demasia o resultado para a estimativa de perda de solo.

Quanto ao uso dos dados da SRTM para a estimativa de perda de solo, conclui-se que os mapas gerados apresentaram resultados adequados para a bacia estudada, pois, uma vez que os valores indicados nas matrizes levam em consideração resultados diferentes, simplesmente, acabam por não considerar a proximidade entre os valores. Com isso, os limites entre as classes podem alocar em classes diferentes valores semelhantes entre si. Assim sendo, para efeito de planejamento macro, quando estudos preliminares devem ser elaborados baseados no MDT, os dados corrigidos pela Embrapa e disponíveis gratuitamente podem ser utilizados.

Capítulo V – Conclusões

Este trabalho realizou uma avaliação do potencial de utilização dos dados provenientes da SRTM utilizando a estimativa dos valores de perda de solo para a bacia do Ribeirão do Feijão em São Carlos, SP, como fator comparativo. A estimativa de perda de solo foi elaborada por meio da aplicação do modelo EUPS. Para tanto foram empregados os fatores erodibilidade do solo, erosividade da chuva, topografia e cobertura do solo para toda a bacia. O modelo EUPS foi então aplicado para as duas fontes de dados topográficos, MDT/referência gerado a partir da carta topográfica em escala 1:50.000 e MDT/SRTM com resolução de $\approx 90\text{m}$.

A análise dos resultados obtidos para a estimativa de perda de solo através da carta topográfica revelou que a bacia estudada apresenta baixa vulnerabilidade natural aos processos erosivos, o que significa que o uso do solo é o fator mais influente sobre os maiores valores de estimativa de perda de solo encontrados. Os tipos de solos que mais interferiram nos valores de EPS foram, em ordem decrescente, o Latossolo Vermelho Amarelo (6), a Areia Quartzosa Profunda (4), o Litólico (2), o Latossolo Roxo (3), o Podzólico Vermelho (7), o Latossolo Vermelho Escuro (5), os Hidromórficos (1) e, por fim, a Terra Roxa Estruturada (8). Evidentemente que a perda de solo para cada tipo de solo está associada aos demais fatores da EUPS. Assim, não significa que o Latossolo Vermelho Amarelo (6), que apareceu nas grandes perdas, em outras condições de chuva, LS e uso e cobertura, apresentariam os mesmos resultados.

Os valores de LS mais abundantes nas grandes perdas foram os dentro do intervalo $1 \text{ -- } 10$, presentes em 57,7% da área e 2.575 ha; seguidos dos valores entre $10 \text{ -- } 50$, presentes em 21,3% da área e 950 ha; depois os valores da classe <1 apareceram em 13,7% da área e 610 ha; em seguida o intervalo entre $50 \text{ -- } 100$ apareceu em 5,5% das áreas com perdas $>100 \text{ ton/ha/ano}$ e 246 ha e, por fim, o intervalo >100 apareceu em 1,7% da área e 79 ha.

A classe de uso e cobertura mais abundante nas áreas com EPS $>100 \text{ ton/ha/ano}$ é o solo exposto, presente em 50,7% da área e 2.261 ha; seguido pela cultura de laranja que

aparece em 30,3% das grandes perdas e 1.351 ha; a seguir pela cultura de cana-de-açúcar em 7,7% das perdas maiores e 345 ha; a mata ciliar aparece em 6,5% e 291 ha, esta está presente nos grandes valores de estimativa de perda, devido ao fato de ocorrer nos locais das Cuestas Basálticas, onde os valores elevados de LS conduziram a grandes valores de EPS. O pasto está em 3,0% das grandes perdas e 135 ha; o cerradão em 1,7% e 78 ha e, por fim, o reflorestamento e a zona urbana não aparecem nas áreas com EPS >100 ton/ha/ano. Porém, deve-se observar que, apesar da área urbana possuir valor CP de 0,001, sabe-se que dentro das cidades ocorrem áreas com loteamentos sem nenhuma cobertura e contenção de águas pluviais que muitas vezes conduzem à erosão.

Ao final, observou-se que o fator cobertura do solo é o fator de maior influência sobre os valores altos encontrados para estimativa de perda de solo. Portanto, a atuação do homem durante a escolha do uso e ocupação do espaço tem função determinante sobre a manutenção dos recursos do solo e da água. Atualmente existem técnicas para a implantação de sistemas capazes de produzir em equilíbrio com o meio. Desenvolvendo ações conservacionistas, de consórcio de culturas, de produções agroflorestais e de ampliação das áreas de preservação, será possível obter bons resultados no sentido de diminuir a poluição e as perdas de solo. A perda de solo não traz prejuízos somente para mananciais e sistemas de tratamento de água, mas também para as populações em geral, uma vez que ocasiona redução da produtividade agrícola e do volume útil dos reservatórios para produção de energia elétrica e abastecimento de água.

A avaliação da acurácia dos dados gerados a partir do MDT/SRTM revelou que, por se tratar de uma bacia hidrográfica na qual o fator LS não é o fator de maior influência sobre o carreamento de sedimentos, a resolução grosseira do MDT/SRTM foi amenizada pela resolução do mapa de uso do solo. O valor de Kappa para a perda de solo foi de 0,4199, enquanto que para o fator LS foi de 0,2584, portanto houve uma melhora no valor do índice Kappa após a multiplicação do mapa de uso e cobertura do solo. A maior parte dos erros aconteceu ao longo dos limites entre as classes, tanto nos valores como em regiões do mapa, pois são estas regiões que apresentam maior confusão entre as informações.

De maneira geral, o MDT/SRTM, apesar da resolução de $\approx 90\text{m}$, apresentou resultados razoáveis em comparação com os resultados obtidos a partir da carta topográfica em escala 1:50.000. Portanto, para efeito de estimativa, em função da facilidade de aquisição

gratuita dos dados, os resultados de estimativa de perda de solo para a bacia estudada podem ser considerados adequados.

5.1. Recomendações

Preocupações ambientais disseminadas pela população em muitos trabalhos científicos, publicados em diferentes locais do mundo, mostram que as questões ambientais são comuns atualmente. Dentre várias destas preocupações, podemos destacar a erosão hídrica, as atividades ao longo das margens dos rios e as mudanças na utilização do solo para agricultura e pasto como sendo fatores que influenciam na quantidade de sedimentos e de outros contaminantes presentes nas águas e nos solos. Para que sejam parcialmente protegidas, as áreas ao redor dos cursos d'água devem ser recuperadas com matas ciliares para manutenção da qualidade da água (adaptado de Nunes e Pinto, 2007; Steiner et al., 2008). A cobertura vegetal é determinante para a minimização dos impactos relacionados causados pelos processos erosivos, por isso destaca-se a grande importância do planejamento do uso do solo com o intuito de aplicar o manejo adequado às bacias hidrográficas.

A ocorrência de grandes valores para a estimativa de perda de solo revela que existe contaminação dos recursos hídricos por sedimentos e poluentes, carregados pela erosão na bacia estudada. Este fato evidencia a necessidade de implantação de novas práticas de maneira a minimizar as perdas de solo. As áreas de maior risco potencial estão localizadas nas áreas das Cuestas Basálticas, onde estão as grandes declividades. Também merecem atenção especial as áreas mais planas nas cabeceiras dos rios que são utilizadas para exploração agrícola e permanecem descobertas durante um período do ciclo produtivo. Nestas áreas, técnicas de análise criteriosa devem ser empregadas com a intenção de melhorar o manejo ou substituir a cobertura do solo por atividades de menor impacto, já que se trata de uma bacia de abastecimento de água para a população localizada a montante de diversas hidrelétricas presentes no Rio Tietê.

Junto ao transporte do solo para as partes mais baixas da bacia, são carregados os agrotóxicos, fertilizantes e dejetos da pecuária que pioram a qualidade da água no local da captação para abastecimento urbano. Contudo, é possível evitar o transporte de contaminantes para os recursos hídricos se houver uma redução, ou mesmo eliminação, do uso de contaminantes a montante da captação de água. A forma de redução da entrada de poluentes está relacionada ao manejo adequado da área de captação da bacia. O manejo adequado passa

pela utilização de técnicas como terraceamento com plantio em curvas de nível nas áreas de agricultura e também monitoramento e avaliação para recuperação das áreas de preservação permanente - APPs. É sabido que as APPs têm função de grande importância na retenção de sólidos e, conseqüentemente, no transporte de solos e contaminantes para os recursos hídricos superficiais (Paes et al., 2010). Entretanto, existem limitações sobre a utilização de terraceamento e de APPs para a contenção de contaminantes para água de subsuperfície, pois esta bacia está sobre a zona de recarga do aquífero Guarani e apresenta Areia Quartzosa em 42% da sua área, possuindo grande capacidade de infiltração (Nishiyama, 1991). Especificamente para o caso desta bacia hidrográfica, recomenda-se que, além da aplicação das técnicas acima citadas, sejam utilizados mecanismos para mudança de uso do solo, e, com isso, diminuir a quantidade de produtos químicos utilizados na agropecuária de toda a região da bacia, já que a ocorrência de Areia Quartzosa implica em maior velocidade de infiltração da água contaminada para o aquífero Guarani.

Outro mecanismo de via indireta de redução da emissão de contaminantes foi o estudo realizado por Machado (2010) que propõe, com bons resultados, a compensação financeira para estímulo à participação popular no processo de gestão desta bacia hidrográfica. Os resultados obtidos mostram a avaliação de uma das alternativas para viabilizar a recuperação ou manutenção do manancial por meio de cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Levantamentos realizados com a população urbana da cidade de São Carlos (SP) mostram Disposição a Pagar – DAP – em sua conta de água de 56% para uso e manutenção/recuperação dos recursos hídricos na bacia hidrográfica manancial do Ribeirão do Feijão, totalizando R\$8 milhões/ano. Recursos financeiros de outras fontes estão previstos na legislação brasileira e podem aumentar a velocidade de recuperação do manancial. A literatura mostra casos passados de introdução de alterações economicamente atraentes, como alternativa chave para a solução de problemas ambientais com melhora dos recursos da comunidade local e incentivos à participação e à manutenção contínua dos sistemas (Willett e Porter, 2001).

Finalmente a vegetação e o uso adequado do solo têm a função de proteger as terras e devem ser cultivados para que os mananciais permaneçam protegidos de contaminação ou assoreamento. As culturas, principalmente nas bacias de mananciais de abastecimento de água, devem ser feitas de forma que não produzam poluição por excesso de produtos químicos ou por descobrir o solo durante o ciclo de cultura.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T.. *Gestão Ambiental de Áreas Degradadas*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 320p., 2005.

AVANZI, J. C.. *Técnicas de prevenção e de controle da erosão laminar*. Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo. 2010.

BABAN, S. J.; YUSOF, K. W.. Modeling soil erosion in tropical environments using remote sensing and geographical information systems. *Hydrological Sciences - Journal-des Sciences Hydrologiques*, vol.46(2), 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.. *Conservação do Solo*. 4ª ed., São Paulo: Ícone. 355p.. 1999.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C.. Soil erosion prediction in the grand river basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 79, p. 49-59, 2009.

BITAR, O. Y.. *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Geologia, 274p.,1995.

BOSSIO, D.; JEWITT, G.; ZAAG, P. V. D.. Smallholder system innovation for integrated watershed management in Sub-Saharan Africa. *Agricultural Water Management*, 98, 1683-1686, 2011.

CAMPAGNOLI, F.. The Production of the Sediment of the South America Continent: Propose of Mapping of the Erosion Rates Based on Geological and Geomorphological Aspects. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 7, n1, 2006.

CARVALHO, T. M.; BAYER, M.. Utilização dos Produtos da “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) no Mapeamento Geomorfológico do Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 9, nº 1, 35-41, 2008.

CEPLAC - Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira. Disponível em:<<http://www.ceplac.gov.br>>. Acesso em: 15 maio 2010.

CHAVES, H. M. L.. *Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco*. Relatório final de Consultoria. CODEVASF/FAO, Brasília, 1994.

LUZ, F. G. F.. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

CHIANG L.; CHAUBEY I.; GITAU M. W.; ARNOLD J. G.. Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a ceap watershed using the swat model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 53(5): 1569-1584, 2010.

COHEN, J.. A coefficient of agreement of nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v.20, p. 37-46, 1960.

CONGALTON, R. G.. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46, 1991.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K.. A practical look at sources of confusion in error matrix generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v.59, n.5, 641-644, 1993.

COSTA, C. W.. *Expansão da mancha urbana e suas consequências sobre os mananciais do rio do Monjolinho e Ribeirão do Feijão da cidade de São Carlos, SP*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos hídricos), NEPA, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2010.

COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; PONS, N. A. D.. Regulamentos de uso do solo e impactos ambientais: avaliação crítica do plano diretor participativo do município de São Carlos, SP. *Geociências*, v. 31, n. 2, p. 143-157, 2012.

CUNHA, R. C.. *Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência Fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades. Estudo do caso da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2012.

CUNHA, R. C.; DUPAS, F. A.; TUNDISI, J. G.. Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades: estudo de caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP. *Geociências*. 2011. (UNESP. Impresso no prelo)

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. Departamento de Águas e Energia Elétrica instituto Geológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, 2005.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G.. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. v.51, n.5, 427 - 433, 1996.

DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes*. 19, 629 - 650, 2005.

FARINASSO, M.; CARVALHO, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M.. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da

EUPS - equação universal de perda de solo utilizando novas metodologias em Sig para os cálculos dos seus fatores na região do alto Parnaíba - Pi-Ma. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 7, nº 2, 2006.

FERREIRA, V. M.. *Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 84 p., 2005.

FISTIKOGLU, O.; HARMANCIOGLU, N. B.. Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion. *Water Resources Management*. Vol. 16: 447-467, 2002.

FOODY, G. M.. Classification accuracy comparison: Hypothesis tests and the use of confidence intervals in evaluations of difference, equivalence and non-inferiority. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1658-1663, 2009.

GOMES, G. L. M. *Diagnóstico de áreas degradadas por voçorocas no município de Alterosa - MG*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 59p., 2006.

HANCOCK, G. R.; MARTINEZ, C.; EVANS, K. G.; MOLIERE, D. R.. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. *Earth Surface Processes and Landform*. 31, 1394-1412, 2006.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E.. Um método para a determinação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo. *Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite* - Embrapa, Campinas, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folhas topográficas de São Carlos e Corumbataí*- SF-23-Y-A-I-1 e SF-23-Y-A-I-2. Escala 1:50.000, 1972.

IPT. *Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema aquífero Guarani no Estado de São Paulo*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 103 pág., 2011.

IRVEM, A.; TOPALOGLU, F.; UYGUR, V.. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. *Journal of Hydrology*. 336, 30-37, 2007.

JAIN, M. K.; KOTHYAR, U. C.. Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Using GIS. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*. 45(5), 2000.

KULKARNI, S. S.; SWAMI, V. A.; BORCHATE, S. S.; SAWANT, A. B.. Watershed Management through social mapping - a means of community participation. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3 No. 9, 6883-6888, 2011.

LANDIS J. R.; KOCK G. G.. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. v 33, 159-174, 1977.

LUZ, F. G. F.. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

LIN, S.; JING, C.; COLES, N. A.; CHAPLOT, V.; MOORE, N. J.; WU, J.. Evaluating DEM source and resolution uncertainties in the soil and water assessment tool. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, DOI 10.1007/s00477-012-0577-x, 2012.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C.. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solos em Campinas, SP. *Bragantia*. Campinas, v.51, n.2, 189-196, 1992.

MAY, P. H.; TROVATTO, C. M. M.; DEITENBACH, A.; FLORIANI, G. S.; DUBOIS, J. C. L.; VIVAN, J. L.. *Manual agroflorestal para a Mata Atlântica*. Ministério do Desenvolvimento Agrário. 196p., 2008.

MACHADO, F. H.. *Valoração econômica dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do manancial do Ribeirão do Feijão - São Carlos, SP*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá-MG, 127p., 2010.

MELLO, C. R.; SÁ, M. A. C.; CURI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M.. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.42, n.4, 537-545, 2007.

MIRANDA, E. E.. *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 jun. 2011.

MOREIRA, M. C.; CECÍLIO, R.A.; PINTO, F.A.C.; LOMBARDI NETO, F.; PRUSKI, F.F.. *Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no estado de São Paulo utilizando redes neurais artificiais*. Engenharia na Agricultura. Viçosa, MG, v.14, n.2, 88-92, 2006.

MORETI, D.; CARVALHO, M.P.; MANNIGEL, A.R.; MEDEIROS, L.R.. Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Vol. 27:713-725, 2003.

NEVES, S. M. A.; NEVES, R. J.; FORNELOS, L. F.. Aplicação de imagens do RADAR interferométrico (SRTM) na avaliação da fragilidade da bacia do córrego cachoeirinha, nos municípios de Cáceres e Porto Estrela/MT. *Revista Geográfica Acadêmica*. v.2, n.2, 124-137, 2008.

NISHIYAMA, L.. *Mapeamento Geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos, SP*. Tese de Doutorado em Geotécnica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

NUNES, F. P.; PINTO, M. T. C.. Conhecimento local sobre a importância de um reflorestamento ciliar para a conservação ambiental do Alto São Francisco, Minas Gerais. *Biota Neotropica*. vol.7:3, 2007.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H.. *Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos*. Instituto Agrônomo de Campinas. 188p, 1984.

LUZ, F. G. F.. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

OLIVEIRA, P. T. S.; SOBRINHO, A.T.; RODRIGUES D.B.B.; PANACHUKI, E.. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. *Water Resources Management*. 25:1021-1036, 2011.

PAES, F. S.. *Áreas de Preservação Permanente em bacias hidrográficas e sua importância na prevenção da perda de solo por erosão*. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA, IRN, Universidade Federal de Itajubá, 60p., 2010.

PAES, F. S. ; DUPAS, F. A. ; SILVA, F. G. B.; PEREIRA, J. C. D.. Espacialização da perda de solo nas bacias hidrográficas que compõem o município de Santa Rita do Sapucaí (MG). *Geociências* (UNESP. Impresso), v. 29, p. 537-549, 2010.

PALM, C.; SANCHES, P.; AHAMED, S.; AWITI, A.. Soils: a contemporary perspective. *Annual Review of Environmental Resources*. 32, 99-129, 2007.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M.; MAL, B. C.. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and Remote Sensing. *Water Resources Management*, 21:729-746, 2007.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. *Revista Geográfica Acadêmica*. v.2, n.2, 84-95, 2008.

PIMENTA, M. T. *Diretrizes para a aplicação da equação universal de perdas dos solos em SIG: factor de cultura C e factor de erodibilidade do solo K*. [s.l.]: INAG/DSRH, 1998.

PINHEIRO, E. S.. Comparação entre dados altimétricos *Shuttle Radar Topography Mission*, cartas topográficas e GPS: numa área de relevo escarpado. *Revista Brasileira de Cartografia*. n. 58/1, 2006.

POKHAREL, S.. Water use opportunities and conflicts in a small watershed - a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1288-1299, 2007.

PONS, N. A. D.; PEJON, A. J.; ZUQUETTE, L. V.. Use of geoprocessing in the study of land degradation in urban environments: the case of the city of Sao Carlos, state of Sao Paulo, Brazil. *Environmental Geology*, v. 53, n. 4, p. 727-739, 2007.

PORTELA, J. C.; COGO, N. P.; BAGATINI, T.; CHAGAS, J. P.; PORTZ, G. Restauração da estrutura do solo por sequências culturais implantadas em semeadura direta, e sua relação com a erosão hídrica em distintas condições físicas de superfície. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. vol. 34, 1353-1364, 2010.

PRADO, J. P. B.; NOBREGA, M.T.. Determinação de perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em cidade gaúcha, estado do Paraná, com aplicação da equação universal de perda de solo (EUPS). *Acta Scientiarum Technology*, v.27, n. 1, p. 33-42, 2005.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. Material Didático: arquivos de transparências (CD). Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.

LUZ, F. G. F.. *Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática - NEPA. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG. 2012.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R.. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 4, 241-262, 2003.

REIS, A.; ROGALSKI, J. M. (Org.). Novos aspectos na restauração de áreas degradadas. Florianópolis: PetBiologia/UFSC, 80 p.2006.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E. W.; VERDUM, R., DENARDIN, D. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.11, n.2, 11-23, 2010.

RODRIGUES, G. O.. *Análise da acurácia temática das classificações de imagens orbitais AVNIR-2/ALOS, CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5, comparando as abordagens de Máxima Verossimilhança e Fuzzy*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2009.

SAHRAWAT, K. L.; WANI, S.P.; PATHAK, P.; REGO, T.J.. Managing natural resources of watersheds in the semi-arid tropics for improved soil and water quality: A review. *Agricultural Water Management*, 97, 375-381, 2010.

SILVA, A. M.; ÁLVARES, C. A.. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. *Revista Geociências*. São Paulo, v.24, n.1, 33-41, 2005.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.. Estimativa e análise do fator topográfico (LS) da equação universal de perda de solo com o uso de aplicativo informatizado compatível com software de geoprocessamento. Galeria de Artigos Acadêmicos, *Fator GIS*, 9p., 2003.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B.. *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*. São Carlos. Editora Rima, 138p., 2004.

SILVA, R. M.; SANTOS C. A. G.. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIGR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.5, p.520-526, 2008.

SILVA, V. C.. Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG/GO/DF). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 34 (3): 147-159, 2004.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E.. Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. *Soil Science Society American Journal*. v.65, 1479-1486, 2001.

STEINER, J. L.; STARKS, R. I.; DANIEL, A.; GARBRECHT, J. D.; MORIASI, D.; MCINTYRE, S.; CHENG, S.. Environmental effects of agricultural conservation: A framework for research in two watersheds in Oklahoma's Upper Washita River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*. vol. 63, no.6, 2008.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F.. *Decifrando a Terra*. 2ª ed. São Paulo: oficina de textos. 527p. 2000.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; SEDEGALIS, C.. Eutrofização na América Latina. *Eutrosol, Academia Brasileira de Ciências*, CNPq, 532 pg. 2006.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.; DUPAS, F. A.; SILVA E SOUZA, A. T.. *Uso atual e uso potencial do solo no município de São Carlos, SP - base do planejamento urbano e rural*. Relatório final de Projeto de Políticas Públicas da FAPESP, proc. nº. 98/10924-3. 2007.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. *Biota Neotropical*. v.10(4): 67-76. 2010.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.. Topographic modeling of Marajó island with SRTM data. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.9, n.1, 53-64, 2008.

VENTE, J.; POESEN, J.; GOVERS, G.; BOIX-FAYOS, C.. The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modeling. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34, 1994-2007, 2009.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G.. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I - Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência Solo*. Vol.32:801-814. 2008.

WILLETT, I. R.; PORTER, K. S.. Watershed Management for Water Quality Improvement: the role of agricultural research. *Australian Centre for International Agricultural Research*, 56 pág., 2001.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D.. *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*. Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook, n.282, 49p., 1972.

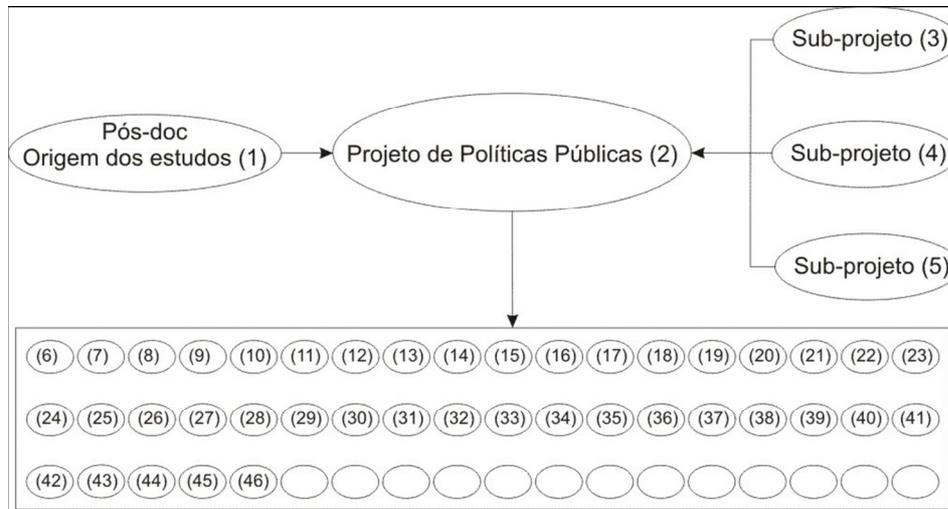
WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D.. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook, n.537, 58p., 1978.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R.. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a Gis framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation & Development*. 20: 84-91, 2009.

ZUQUETTE, L. V.. Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1981.

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B.; PEJON, O. J.. Methodology to assess groundwater pollution conditions (current and predisposition) in the São Carlos and Ribeirão Preto regions, Brazil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 68, n. 1, 117-136, 2009.

ANEXO I – Histórico dos estudos já realizados desde 1997 na bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, com financiamento da FAPESP, CNPq, CAPES e Fapemig.



() Artigos, Relatórios de Projetos, doutorados, dissertações, iniciações científicas com apoio da Fapesp, Fapemig, CNPq e Capes na forma de bolsas e auxílio financeiro utilizando São Carlos (SP) como área de estudo e demais trabalhos.

- (1) até (12) Já concluídos até 2007 durante a vigência do projeto – formato *Itálico*.
- (13) até (31) Já concluídos e em andamento após a vigência do projeto em 2007 e 2007 – formato Arial.
- (32) até (45) Já concluídos e em andamento - trabalhos correlatos fora da cidade de São Carlos – formato Times New Roman.

TRABALHOS CONCLUÍDOS DURANTE A VIGÊNCIA DO PROJETO – ATÉ 2007.

- (1) DUPAS, F. A. (2001). **“Crescimento Urbano e suas Implicações Ambientais - Proposta de redirecionamento de cidades de médio porte utilizando as variáveis ambientais, sensoriamento remoto e SIG: Estudo do caso de São Carlos, SP”**. Relatório de pós-doutorado FAPESP, proc. n. 97/07066-2 e 97/07055-0. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN/UNIFEI. UFSCar, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, 63 pg.
- (2) TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.; DUPAS, F. A.; SILVA-SOUZA, A. T.; SHIBATTA, O. A. (2007). **“Uso atual e uso potencial do solo no município de São Carlos, SP – base do planejamento urbano e rural”**. Relatório final de projeto de pesquisa FAPESP de Políticas Públicas proc. 98/10924-3. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN/UNIFEI. Associação Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental, 95 pg.

- (3) *SUB-PROJETO* (2007). “**Diagnóstico e prognóstico da qualidade da água dos rios que compõe as bacias hidrográficas do município de São Carlos (SP) relacionados com uso e ocupação do solo**”, Proc. 98/10924-3.
- (4) *SUB-PROJETO* (2007). “**Estudo do Índice de Integridade Biótica (IIB) da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão**”, Proc. 98/10924-3.
- (5) *SUB-PROJETO* (2007). “**Análise da influência do uso e ocupação do solo sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão**”, Proc. 98/10924-3.
- (6) *MOLINA Jr., V. E.* (2003). “**Recursos Hídricos superficiais da área urbana e de expansão da cidade de São Carlos, SP - Estudo multitemporal**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana - Universidade Federal de São Carlos, Fapesp. Co-Orientador:–.processo n. 01/02562-9, 104 pg.
- (7) *POLI, M. N.* (2004). “**A geografia do espaço vivido: Análise do uso social do solo urbano - estudo de caso na cidade de São Carlos, SP**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana - Universidade Federal de São Carlos, Fapesp. Co-Orientador:–.processo n. 01/08369-6, 229 pg.
- (8) *DUPAS, F. A.; SOUZA, Ângela Teresa Silva e; TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura; ROHM, Sérgio Antonio.* **Indicadores ambientais para planejamento e gestão de bacias hidrográficas.** In: José Galizia Tundisi; Matsumura-Tundisi, T.; Galli, C.S.. (Org.). *Eutrofização na América do Sul: causas, conseqüências e tecnologias para gerenciamento e controle - EUTROSUL.* São Carlos: DMD, 2006, v., p. 491-506.
- (9) *SOUZA, Ângela Teresa Silva e; SCHIBATTA, Oscar Akio; TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura; DUPAS, F. A..* **Parasitas de peixes como indicadores de estresse ambiental e eutrofização.** In: José Galizia Tundisi; Matsumura-Tundisi, T.; Galli, C.S.. (Org.). *Eutrofização na América do Sul: causas, conseqüências e tecnologias para gerenciamento e controle - EUTROSUL.* São Carlos: DMD, 2006, v. 1, p. 373-386.
- (10) *LUZ, S. R.* “**Análise da relação entre o uso de agrotóxicos, solo e água**”. 2007. Relatório de bolsa de iniciação científica CNPq. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (11) *GANNAM, M. G.* “**Mapa de uso e ocupação do solo utilizando fotografias aéreas originadas de sensores e aeronave de baixo custo. estudo de caso da bacia do córrego Feijão em São Carlos, SP**”. 2007. Relatório de bolsa de iniciação científica Fapemig. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (12) *ROSELLI, R. G.* “**Aplicação de metodologia para estudo da influência do uso e ocupação do solo sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do alto Rio Sapucaí**”. 2006. Relatório de bolsa de iniciação científica CNPq. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.

TRABALHOS CONCLUÍDOS E EM ANDAMENTO APÓS A VIGÊNCIA DO PROJETO – 2007.

- (13) GUIMARÃES, M. W. O. (2008). “**Estudo da relação entre as variáveis ambientais da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**”. Relatório de bolsa de iniciação científica CNPq. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (14) AFONSO, G. F. (2008). “**Integração de dados baseada em ontologia**”, Dissertação de Mestrado em Computação. Dep. Computação, Universidade Federal de São Carlos.
- (15) RODRIGUES, G. O. (2009). “**Análise da acurácia temática de classificações de imagens orbitais AVNIR-2/ALOS, CCD/CBERS- 2 E TM/LANDSAT-5, comparando as abordagens de Máxima Verossimilhança e Fuzzy**”. Dissertação Mestrado em Engenharia de Energia, Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá, Capes.
- (16) VIEIRA, A. M. (2009). **Estudo da relação entre as variáveis ambientais da bacia hidrográfica do Rórrego do Feijão, São Carlos, SP. Estruturação de banco de dados para ambiente de simulação**. Projeto de Iniciação Científica PROBIC – FAPEMIG, Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá. 16 pág.
- (17) PEREIRA, P. R. G. (2010). “**Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para avaliação do nível de degradação ambiental na bacia do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**”. Relatório de bolsa de iniciação científica CNPq. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (18) COSTA, C. W. (2010). “**Expansão da mancha urbana e suas consequências sobre mananciais de São Carlos, SP**”. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá, Capes.
- (19) VIANA, E. H. (2010). “**Estruturação de Banco de Dados Físicos, Químicos, Biológicos e Geográficos da Bacia do Córrego Feijão em São Carlos-SP**”. Relatório de bolsa de iniciação científica CNPq. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (20) OLIVEIRA, J. A. (2011). “**Análise da quantidade de sedimentos em bacia hidrográfica - Estudo do caso do caso do Ribeirão do Feijão em São Carlos, SP**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN Universidade Federal de Itajubá.
- (21) MACHADO, F. H. (2011). “**Valoração econômica dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão - São Carlos, SP**”. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá, Capes.
- (22) CAVALCANTE, T. D. M.. **Planejamento do uso do solo em bacias hidrográficas. Estudo do caso do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**. Início: 2011. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá (em andamento).
- (23) CUNHA, R. C; DUPAS, F. A.; TUNDISI, J. G. **Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades: estudo de caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**. 2011. Revista Geociências (UNESP. Impresso) **JCR**, v. 30, p. 399-414, 2011.
- (24) YAGUINUMA, C. A., AFONSO, G. F., FERRAZ, V., BORGES, S., SANTOS, M. T. P. (2011). **A Fuzzy Ontology-Based Semantic Data Integration System**. Journal of

Information & Knowledge Management, Vol. 10, No. 3, pg. 285-299. DOI: 10.1142/S0219649211002997.

- (25) LUZ, F. G. F. (2012). **“Avaliação do potencial de utilização dos dados da SRTM - Shuttle Radar Topography Mission por meio da análise da estimativa de perda de solo para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá, Capes.
- (26) GONÇALVES, F. K.. **Análise da influência do uso e cobertura do solo sobre os recursos hídricos. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos, SP**. Início: 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá, CAPES (em andamento).
- (27) CUNHA, R. C. da (2012). **“Zoneamento ambiental em bacia hidrográfica utilizada como manancial urbano. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão - São Carlos, SP”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá, Capes.
- (28) OTTOBONI, R. (2012). **Desenvolvimento do banco de dados(BD) ambientais para otimização de análises do processo de transporte de solo para reservatórios de geração hidrelétrica. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos SP**. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN, Dissertação de mestrado, Engenharia da Energia, UNIFEI (em andamento).
- (29) COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; PONS, N. A. D.. **Regulamentos de uso do solo e impactos ambientais: avaliação crítica do plano diretor participativo do município de São Carlos, SP**. Geociências (UNESP. Impresso) **JCR**, 2012. (no prelo)
- (30) COSTA, C. W. ; DUPAS, F. A. ; SILVA, L. F. . **Monitoramento e predição de expansão populacional e urbana e o consumo de recursos naturais na cidade de São Carlos, SP**. Geociências (UNESP. Impresso), 2012. (no prelo).
- (31) MACHADO, F. H. ; DUPAS, F. A. . **Análise econômica do uso do solo e da disposição a pagar para proteção ambiental dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do manancial do Ribeirão do Feijão, São Carlos - SP**. Geousp (USP), 2012. (no prelo).

TRABALHOS CORRELATOS FORA DA CIDADE DE SÃO CARLOS – CONCLUÍDOS E EM ANDAMENTO

- (32) OLIVEIRA, T. F. **“Análise preliminar da influência do uso e ocupação do solo sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do alto Rio Sapucaí, MG”**. 2003. 37 f. Relatório de bolsa de iniciação científica Fapemig. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (33) COSTA, I. G. D. D. (2006). **“Análise da perda de solo através de SIG e sensoriamento remoto. Estudo do caso de Santa Rita do Sapucaí, MG”**. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Trabalho de Conclusão de Curso, Fapemig - Universidade Federal de Itajubá.

- (34) DUPAS, F. A. (2009). **“Plano Diretor Participativo de Santa Rita do Sapucaí, MG”**. Relatório final de projeto CNPq n. 060/2005 proc. n. 501840/2005-2. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática NEPA - IRN –UNIFEI, maio, Volumes I de II, 243 pg.
- (35) HONÓRIO, D. H. **“Utilização da ferramenta Idrisi Taiga - módulo ETM na análise espacializada de tendências climáticas no Brasil”**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN - Universidade Federal de Itajubá.
- (36) PEREIRA, J. C. (2010). **“Aplicação do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão Cachoeirinha, MG”**. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, IRN, Universidade Federal de Itajubá, 116 pg.
- (37) PAES, F. S. (2010). **“Áreas de Preservação Permanente em bacias hidrográficas e sua importância na prevenção da perda de solo por erosão”**. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN, Universidade Federal de Itajubá, 60 pg.
- (38) SPERANDELLI, D. I. (2010). **“Dinâmica e análise do crescimento, dos vazios e das áreas verdes urbanas de Atibaia, SP”**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática – NEPA, IRN. Universidade Federal de Itajubá.
- (39) PAES, F. S.; DUPAS, F. A.; SILVA, Fernando das Graças Braga da; PEREIRA, J. C. D. . **Espacialização da perda de solo nas bacias hidrográficas que compõem o município de Santa Rita do Sapucaí (MG)**. Geociências (UNESP. Impresso) **JCR**, v. 29, p. 537-549, 2010.
- (40) ABE, C. A.. **Características do uso do solo de entorno e suas implicações em Unidade de Conservação. Estudo do caso do Parque Nacional do Itatiaia, RJ**. Início: 2011 - Universidade Federal de Itajubá, CNPq (em andamento).
- (41) TEIXEIRA, D. R.. **Análise comparativa dos instrumentos de gestão em unidades de conservação visando a gestão socioambiental no Cone Sul. Início: 2012**. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. (Co-orientador). (em andamento).
- (42) BUGANA, G. O.. **Análise da expansão urbana da cidade de Bragança Paulista, SP**. Início: 2012. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (em andamento).
- (43) ALVES, B. S. J. N.. **Análise da expansão urbana da cidade de Lorena, SP**. Início: 2012. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá (em andamento).
- (44) GARGALHIONI, Saulo Roberly ; DUPAS, F. A. ; RODRIGUEZ-ARDILA, A.. **Previsão dos impactos causados por poluição luminosa com ênfase sobre sítios de observação astronômica e síntese da proposta de legislação nacional**. HOLOS Environment (Online), v. 12, p. 27-40, 2012 **JCR**.

- (45) SPERANDELLI, D. I. ; DUPAS, F. A. ; PONS, N. A. D.. **Urban sprawl, vacant land and green spaces dynamics on the metropolitan fringe of São Paulo, Brazil.** Journal of Urban Planning and Development **JCR**, ASCE, 2012 (no prelo).
- (46) SPERANDELLI, D. I. ; DUPAS, F. A.. **Dinâmica de expansão, áreas verdes e vazios urbanos na cidade de Atibaia (SP).** Geosp (USP), 2012. (no prelo).