

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE
VULNERABILIDADE À EROÇÃO HÍDRICA COM
BASE NA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE
SOLO (USLE)

Thiago Vieira da Silva Matos

Belo Horizonte

2015

**DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE
VULNERABILIDADE À EROÇÃO HÍDRICA COM
BASE NA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE
SOLO (USLE)**

Thiago Vieira da Silva Matos

Thiago Vieira da Silva Matos

**DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE
VULNERABILIDADE À EROÇÃO HÍDRICA COM
BASE NA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE
SOLO (USLE)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Sistemas de Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente,

A Deus por sua fidelidade e provisão.

Aos meus pais, Roberto e Cleide, que são a minha rocha. Minhas irmãs, Flora e Ludmila. Minha amada esposa, Dandara, pela paciência e compreensão.

Aos colegas, professores e principalmente os funcionários do SMARH.

Ao meu orientador, Jorge Tarqui, pela paciência, fraternidade, sinceridade e liberdade.

A FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pela bolsa de estudos que facilitou a dedicação a pesquisa.

Aos amigos que de alguma forma participaram deste processo me orientando e incentivando: Ciro Vaz, Carolina Astrid, Danilo Marques, Renata Hungari, Luiz Pádua, Guilherme Capita e Carlos Pires.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta a aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) na determinação de áreas vulneráveis à erosão da área a montante da PCH Salto do Paraopeba. Os principais fatores do meio físico e antrópico ativos no processo de erosão hídricas estão contemplados na sua formulação. Baseado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) os fatores do meio físico e antrópicos componentes da equação foram obtidos e tratados para que então fossem determinadas as áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica. Os resultados computados determinaram que pouco mais que 82% da área a montante da PCH possui perdas abaixo do limite médio de tolerância para solos que ocorrem no Brasil. Também foi observado que a escala dos dados utilizados na pesquisa influenciam o resultado da equação. Posteriormente, as informações geradas pela Equação Universal de Perda de Solo, foram confrontadas com o Mapa de Vulnerabilidade dos Solos à Erosão disponível no site do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do estado de Minas Gerais (ZEE-MG). E foi observado que os resultados são divergentes em muitos momentos. A determinação e análise das áreas vulneráveis à erosão hídrica, construída ao longo desta pesquisa, constituem-se em uma poderosa ferramenta para dar subsídio a medidas de manejo adequado. Buscando a utilização mais sustentável dos recursos hídricos, além de garantir a longevidade de barramentos utilizados na geração de energia elétrica.

ABSTRACT

This research presents the application of Equation Universal of Soil Loss (USLE) in the determination of areas vulnerable to erosion area at upstream of PCH Salto do Paraopeba. The main factors of the physical and man-made assets through water erosion process are included in this formulation. Based on a Geographic Information System (GIS) the factors of physical and man-made components through equation were obtained and augers so that then they were certain areas of vulnerability to water erosion. The computed results determined that slightly more than 82% of the area upstream of the PCH has losses below average tolerance for soils that occur in Brazil. Subsequently, the information generated by Equation Universal Soil Loss, were faced with the Map Vulnerability Soil Erosion available on the site of design Ecological-Economic Zoning of the State of Minas Gerais (EEZ-MG). The results are divergent in many instances. Determination and analysis of areas vulnerable to water erosion, built along this research, constitute a powerful tool to grant the appropriate management measures. Seaching for a more sustainable use of water resources, and ensure the longevity of dykes used to generate electricity

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 MODELO MATEMÁTICO DE PREDIÇÃO DE SOLO UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE) E SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG).....	6
3.1.1 Fator de Erosividade (<i>R</i>).....	7
3.1.2 Fator Erodibilidade (<i>K</i>).....	10
3.1.3 Fatores Comprimento do Declive (<i>L</i>) e Grau do Declive (<i>S</i>).....	12
3.1.4 Fator Cobertura e Manejo (<i>C</i>) e Prática Conservacionista (<i>P</i>).....	13
3.2 ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO – VULNERABILIDADE À PERDA DE SOLO.....	16
3.3 PARALELOS ENTRE A EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO E A CARTA VULNERABILIDADE DOS SOLOS À EROSÃO DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DE MINAS GERAIS.....	27
3.4 VARIÁVEIS GEOMORFOLÓGICAS NÃO CONSIDERADAS PELA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE).	30
4. METODOLOGIA	33
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.2 EROSIDADE – FATOR (R)	34
4.3 ERODIBILIDADE – FATOR (K).....	37
4.4 FATOR TOPOGRÁFICO – FATOR (LS).....	38
4.5 FATOR USO E MANEJO (CP).....	40
4.6 CONSTRUÇÃO DO MAPA DE POTENCIAL À EROSÃO ATRAVÉS DO USLE.....	46
4.6.1 Discretização em sub-bacias.....	46

4.7 MAPA DE VULNERABILIDADE DOS SOLOS A EROSÃO - ZEE	48
4.8 MAPA DE FORMA DE TERRENO.....	48
5. RESULTADOS	49
5.1 USO E COBERTURA DO SOLO.....	49
5.2 USO E COBERTURA DO SOLO DA MONTANTE DA PCH SALTO DO PARAOPEBA.....	49
5.3 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO – USLE.	57
5.4 POTENCIAL EROSIVO DA MONTANTE DA PCH SALTO DO PARAOPEBA	71
5.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA USLE COM O MAPA DE VULNERABILIDADE À EROSÃO DO ZEE-MG	76
5.6 USO DE VARIÁVEIS GEOMORFOLÓGICAS EM CONJUNTO DO POTENCIAL EROSIVO RESULTANTE DA USLE.....	82
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Gráfico de distribuição das classes de fragilidade segundo as três metodologias analisadas.	25
FIGURA 2: Fluxograma do fatores da Equação Universal de Perda de Solo e do Mapa de Vulnerabilidade do ZEE-MG.....	28
FIGURA 3: Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.	32
FIGURA 4: Classes de Forma de Terreno.....	32
FIGURA 5: Localização.....	34
FIGURA 6: Coordenadas das estações de monitoramento pluviométrico da área de estudo	35
FIGURA 7: NetErosividade, para estimar os valores mensais e anual de EI30 em qualquer localidade do estado de Minas Gerais.....	36
FIGURA 8.1: Fluxo único.....	40
FIGURA 8.2: Fluxo múltiplo	40
FIGURA 9: Cena LANDSAT 5 utilizada no trabalho.....	42
FIGURA 10: Discretização das unidades de análise	47
FIGURA 11: Mapa de uso e cobertura do solo	50
FIGURA 12: Gráfico de distribuição do Uso do Solo	52
FIGURA 13: Imagens LANDSAT 5 de Áreas urbanas; Ouro Branco	52
FIGURA 14: Imagens LANDSAT 5 representando área industrial (a) e foto da área industrial VSB (b)..	53
FIGURA 15: Imagens LANDSAT 5 representando diferença de vegetação rasteiro e vegetação de alto porte	54
FIGURA 16: Imagens LANDSAT 5 representando a resposta do classe Cultura Temporal e Solo Exposto.....	54
FIGURA 17: Imagens LANDSAT 5 representando a alta reflectância da classe Silvicultura	55

FIGURA 18: Vegetação Arbórea no Córrego Almas Norte, Serra da Moeda	55
FIGURA 19: Vegetação Campestre no (a) Ribeirão do Esmeril, Serra do Esmeril (b) Serra da Moeda ..	56
FIGURA 20: Imagem LANDSAT 5 apresentando a semelhança entre os usos mineração e urbano	56
FIGURA 21: Imagem LANDSAT 5 apresentando a classe água	57
FIGURA 22: Mapa de erosividade	58
FIGURA 23: Mapa de erodibilidade	60
FIGURA 24: Relação LS e Declividade	63
FIGURA 25: Distribuição espacial dos resultados de LS	64
FIGURA 26: Comparação do Fator LS Bertoni (1959) e Desmet e Goovers e McCool <i>et al</i> (1987)	65
FIGURA 27: Mapa do fator topográfico	66
FIGURA 28: Valores LS Bertoni (1959) nos MDEs SRTM e ASTER	67
FIGURA 29: Comprimento de rampa com relação a direção de fluxo	67
FIGURA 30: Valores mínimos e máximos de LS nos MDEs SRTM e ASTER	67
FIGURA 31: Mapa do Fator CP	68
FIGURA 32: Serrapilheira numa área de vegetação arbórea no ribeirão Esmeril	69
FIGURA 33: Reflorestamento de eucalipto de alto porte	70
FIGURA 34: Mapa de Potencial Erosivo baseado em todos os MDEs e metodologias de cálculo do Fator LS.....	73
FIGURA 35: Risco potencial de erosão X Erodibilidade	76
FIGURA 36: Exposição do solo e Fator CP	78
FIGURA 37: Vulnerabilidade à erosão e USLE	79
FIGURA 38: Cruzamento do mapa de vulnerabilidade e USLE.....	80

FIGURA 39: Potencial de perda em Vertentes divergentes.....	83
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Fator CP da EUPS para alguns tipos de cobertura do solo	15
TABELA 2: Vulnerabilidade das unidades de Paisagem Natural	19
TABELA 3: Escala de vulnerabilidade das unidades de paisagem natural	22
TABELA 4.1: Quadro-guia para estimativa da erodibilidade	26
TABELA 4.2: Quadro-guia para estimativa do risco de erosão	27
TABELA 5: Erosividade por Estação Pluviométrica	30
TABELA 6: Valores de Erodibilidade	31
TABELA 7: Comprimento de onda e solução espacial das bandas LANDSAT 5	36
TABELA 8: Classificadores disponíveis no SPRING de acordo com o elemento de classificação e tipo de treinamento	38
TABELA 9: Chave de classificação de Uso e Cobertura do Solo	39
TABELA 10: Uso do solo x fator CP	40
TABELA 11: Variação do Uso do solo a montante da PCH Salto do Paraopeba	42
TABELA 12: Matriz de confusão	44
TABELA 13: Distribuição das classes de Uso do Solo.....	44
TABELA 14: Classe de interpretação da erosividade da chuva	51
TABELA 15: Erodibilidade das unidades de mapeamento	52
TABELA 16: Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação	53
TABELA 17: Classes de distribuição do fator topográfico	56
TABELA 18: Distribuição dos valores de CP	62
TABELA 19: Classes de perda de solo	65
TABELA 20: Tolerância de classes de Potencial erosivo	66
TABELA 21: Distribuição de classe de Potencial erosivo	66

TABELA 22: Potencial erosivo por sub-bacia	68
TABELA 23: Risco potencial de erosão ZEE-MG	70
TABELA 24: Exposição do solo ao impacto da gota de chuva	71
TABELA 25: Susceptibilidade à erosão e USLE	72
TABELA 26: USLE e Susceptibilidade por sub-bacia	74

LISTA DE ABREVIATURAS

- A – Perda do Solo Calculada por Unidade de Área ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
- ACIESP – Academia de Ciências do Estado de São Paulo
- ANA – Agência Nacional de Águas
- APAs – Áreas de Proteção Ambiental
- ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*
- c – Índice de Confiança
- CP – Fator Uso e Manejo e Práticas Conservacionistas
- d – Índice de Concordância
- DAAE – Departamento Autônomo de Água e Esgotos
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica
- DPI – Divisão de Processamento de Imagens
- E_c – Energia Cinética da Chuva
- EI_{30} – Índice de Erosão da Chuva
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- ERSDAC – *Earth Resources Data Analysis Center*
- EUPS ou USLE – Equação Universal de Perdas de Solos ou Soil Loss Equation
- h – hora
- ha – hectares
- HIDROWEB/ANA – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas
- I – Intensidade da Chuva
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- K – Fator de Erodibilidade do Solo ($\text{Mg}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)
- km – quilômetro
- L – Fator do Comprimento do Declive
- LANDSAT – *Land Remote Sensing Satellite*
- LS – Fator Topográfico
- MDE – Modelo Digital de Elevação
- MDT – Modelos Digitais de Terreno
- METI – Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão

Mg – Megagrama ou Tonelada
MJ – Megajoule
mm – milímetros
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NASA – *National Aeronautics and Space Administration*
ND – Números Digitais
NRCS – *Natural Resources Conservation Service*
P – Prática Conservacionista
PAB (Pesq. Agropec. Bras.) – Pesquisa Agropecuária Brasileira
PDI – Processamento Digital de Imagem de Satélite
PMACI – Programa de Meio Ambiente e Comunidades Indígenas
PNMH – Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas
r – Coeficiente de Correlação
R – Fator de Erosividade da Chuva ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
R² – Coeficiente de Determinação
RBCS (R. Bras. Ci. Solo) – Revista Brasileira de Ciência do Solo
REM – Energia Eletromagnética
RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
RNAs – Redes Neurais Artificiais
RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation
S – Grau do Declive
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SPRING – Software para processamento de informações georreferenciadas
SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*
SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*
TM – *Thematic Mapper*
UFLA – Universidade Federal de Lavras
UFV – Universidade Federal de Viçosa
USDA – United States Department of Agriculture
USGS – *United States Geological Survey*
USLE ou EUPS – Soil Loss Equation ou Equação Universal de Perdas de Solos
UTB – Unidade Territorial Básica
UTM – *Universal Transversa Mercator*

WEPP – *Water Erosion Prediction Project*

ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Oxford Dictionary of Earth Sciences (ALLABY, 2009 p. 200) a erosão é definida 1) “com a parte de um processo geral de denudação que inclui a quebra física, a dissolução química e o transporte de material”. 2) “movimento de material de solo e rocha por agentes como água corrente, vento, gelo e arraste gravitacional (movimento de massa)”

Os principais fatores naturais que influenciam o processo da erosão hídrica são: chuva, solo, relevo, cobertura natural e ocupação do terreno. A erosão hídrica é subdividida em duas categorias: erosão laminar; e erosão linear ou erosão de sulco. A erosão laminar caracteriza-se pela remoção de camadas delgadas de solo sobre toda uma área, de forma progressiva e geralmente imperceptível. Já a erosão linear decorre da concentração do escoamento, devido a sua interação com as irregularidades nos terrenos (caminhos preferenciais), aumentando sua capacidade de transporte de sedimento, o que gera a formação de sulcos, que, em estágios avançados, alcançam profundidades consideráveis, formando as denominadas voçorocas (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985).

A erosão hídrica impacta diversas atividades humanas, como a agricultura, o transporte fluvial, a pesca, a geração de energia elétrica etc. O aumento da taxa de erosão em uma bacia hidrográfica, por exemplo, gera assoreamento de corpos de água, como nos reservatórios destinados à geração de energia elétrica. Segundo Carvalho *et al.* (2000, p.11),

[à] medida que o assoreamento cresce, a capacidade de armazenamento do reservatório diminui, a influência do remanso aumenta para montante, as velocidades no lago aumentam e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante, diminuindo a eficiência de retenção das partículas.

Nesse contexto, o estudo do processo de erosão é de muita importância, abordando aspectos como a origem, a rapidez do processo e os prejuízos relacionados à sua ocorrência. O emprego de instrumentos como modelos matemáticos ajudam a compreender e avaliar as ocorrências do processo de erosão hídrica e suas implicações.

Assim, desenvolveram-se modelos empíricos, de fácil execução, tais como o Universal Soil Loss Equation (USLE) e a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), que posteriormente evoluíram para modelos baseados em princípios teóricos, como o Water Erosion Prediction Project (WEPP) (AMORIN *et al*, 2009).

A caracterização do processo de erosão em uma bacia hidrográfica define um zoneamento de áreas vulneráveis à erosão hídrica, o que permite orientar políticas e ações dentro da gestão de recursos hídricos. No Brasil, dentro da Gestão Ambiental, foi estabelecido o Zoneamento Ecológico-Econômico – ZEE, instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente, pelo decreto nº 4.297/2002, que tem como finalidade o ordenamento territorial. Segundo Gomes (2000), para alcançar o objetivo do zoneamento, seria imprescindível uma análise do meio físico e biótico, para gerar uma carta de vulnerabilidade à perda de solo (CREPANI *et al.*, 1996), e outra socioeconômica, para produzir a carta de potencial social (BECKER & EGLER, 1997).

A metodologia para a construção da carta de vulnerabilidade à perda de solo foi desenvolvida a partir do conceito de Ecodinâmica (TRICART, 1977) e pelos produtos de sensoriamento remoto nos estudos integrados. Segundo Crepani *et al.* (2001) para o tratamento digital das imagens utilizadas como “âncora” nessa metodologia, é importante editar os Planos de Informação, bem como montar e manipular o banco de dados que a acompanha. Para tal, utilizou-se o software Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING, desenvolvido no INPE (INPE, 2001).

O primeiro passo para seguir a metodologia é a interpretação das informações temáticas disponíveis (mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal e de uso da terra) sobre as imagens de satélite utilizadas como “âncora”. A partir disso, geram-se as curvas de intensidade pluviométrica, definindo Planos de Informação (PI) temáticos georreferenciados (PI Geologia, PI Geomorfologia, PI Pedologia, PI Vegetação e Uso e PI Intensidade Pluviométrica). A interseção vetorial desses PIs define o mapa de Unidades Territoriais Básicas (PI UTB), composto de unidades de paisagem natural e polígonos de intervenção antrópica. Ao PI UTB, de modelo cadastral, associa-se um banco de dados relacional contendo as classes dos PI temáticos e valores, relativos e empíricos, de vulnerabilidade à perda de solo de cada uma dessas classes (CREPANI *et al*, 2001).

Após a conclusão da primeira etapa, é feita uma classificação do grau de vulnerabilidade de cada unidade territorial baseada nos processos de morfogênese e pedogênese. A vulnerabilidade é expressa pela atribuição de valores (de 1 a 3, num total de 21 valores) para cada unidade de paisagem. Com esse método, é possível elaborar cartas da vulnerabilidade natural à perda de solo a partir de um banco de dados contendo as informações básicas do meio físico e de uso da terra de uma determinada região (CREPANI *et al.*, 2001).

A USLE, devido a seu cunho empírico e ao advento do geoprocessamento, é proposta pela FAO como um modelo matemático que permite definir áreas de vulnerabilidade à erosão. Na década de 50, baseando-se em trabalhos já existentes e em suas próprias experimentações, Wischmeir, em parceria com Smith, combinou vários fatores com a erosividade (R): erodibilidade (K), topografia (LS), cobertura vegetal (C) e as práticas de conservação agrícolas (P). Então nasce a primeira versão da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), aperfeiçoada em 1965 e novamente em 1978, que determina a quantidade de perda de solo em unidades, $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$. Conforme a equação abaixo:

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

Além da USLE, modelos de cunho conceitual foram desenvolvidos nos últimos 20 anos. Fundamentado em Tricart (1977), Ross (1994) criou procedimentos para composição do mapa de fragilidades dos ambientes naturais. Já Meléndez-Pastor *et al* (2006) aproveitaram do potencial da modelagem *fuzzy* e propuseram um modelo baseado em geoprocessamento, considerando os fatores cobertura do solo, tipo de solo e relevo.

Avaliando a equação universal de perda de solo (USLE) com relação à metodologia de construção da carta de vulnerabilidade da ZEE, pode-se assinalar que a diferença entre ambas é que a carta de vulnerabilidade representa o fenômeno de forma conceitual, podendo ser considerada como a sua representação qualitativa. Já a USLE é a representação mais quantitativa, uma vez que o valor de cada fator da construção da equação foi medido em campo, diferentemente da carta.

Portanto, investigar o modelo USLE desde o tratamento de seus parâmetros até suas implicações de disponibilidade e escala das informações, fornecerá referências para

discutir os modelos institucionais vigentes. Além de proporcionar reflexão sobre a concepção de ambos os modelos, sempre evidenciando a aplicação dos mesmos por agentes envolvidos na gestão e conservação dos recursos hídricos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar as áreas de maior vulnerabilidade de perda de solo com base na chave de classificação de perda da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) a montante da PCH do Alto do Paraopeba.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a qualidade e o processo do tratamento das informações para a obtenção dos parâmetros utilizados na Equação Universal de Perda de Solo (USLE), abordando aspectos da escala temporal e espacial.
- Comparar os resultados das áreas obtidos por meio da metodologia proposta com o Mapa da Vulnerabilidade dos solos à erosão da metodologia de Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais.
- Discutir a possibilidade do uso de variáveis geomorfológicas em conjunto dos resultados da USLE.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelo Matemático de Predição de Solo Universal Soil Loss Equation (USLE) e Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Segundo Chaves (1995), os modelos matemáticos podem ser empíricos, mecanísticos e estocásticos. O mais utilizado em ambientes de planejamento conservacionista, planejamento agrícola e gestão ambiental e de recursos hídricos são os modelos empíricos, devido a sua simplicidade e a disponibilidade dos dados.

A Universal Soil Loss Equation (USLE) é um exemplo muito bem sucedido de modelo empírico. Desenvolvido no Agricultural Research Service junto à Universidade de Purdue (EUA), a USLE surgiu da evolução de equações de perdas de solo elaboradas anteriormente e da reunião e interpretação analítica e estatística de dados de perdas de solo e de água, como já explicitado anteriormente. Os experimentos se deram em várias parcelas experimentais sob condições naturais e simuladas de chuvas (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Loch e Roseweel (1992) explicam que, em virtude do embasamento totalmente empírico, o emprego da USLE sem os experimentos demanda pesquisas para a adaptação dos fatores.

Renard *et al.* (1994) e Toy *et al.* (1999) apontam que a equação e seus parâmetros foram desenvolvidos conceitual e metodologicamente. A melhora dos algoritmos para o cálculo do fator topográfico e a ampliação de pesquisas e métodos para a obtenção dos valores de erodibilidade e erosividade para as condições climáticas de regiões diferentes daquela para a qual a equação foi desenvolvida foram alguns dos principais aprimoramentos (LANZA, 2011). Outro fator importante foi o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que facilitou o armazenamento e a integração dos dados, a inserção de algoritmos e modelos, a obtenção de parâmetros de forma automatizada, além da aplicação distribuída e em grandes áreas (FISTIKOGLU e HARMANCIOGLU, 2003).

De acordo com Wischmeier e Smith (1978), originalmente o modelo buscava prever a perda de solo universal, ou seja, sem distinguir a erosão entre laminar ou linear. Entretanto, Amorim, Silva e Pruski (2009) afirmam que o modelo não estima a erosão em sulcos em fase mais avançada. Apesar da aceitação universal da USLE, a forma de

erosão linear do tipo voçoroca, estreitamente relacionada a fatores hidrológicos e geomorfológicos complexos, não foi contemplada pelos fatores da equação. Nesse sentido, a aplicação do modelo, principalmente em escala regional, é limitada à análise de erosão laminar (DAAE e IPT, 1989).

Por trabalhar com um índice anual de chuva, a equação também não é tão eficaz em casos isolados de chuva, dificultando a detecção de eventos que implicam grandes perdas de solo. A USLE também não infere a deposição de sedimentos em vertentes côncavas, o que limita a análise do aporte de sedimentos para fora da área de bacias hidrográficas (CHAVES, 1995). Portanto, é importante frisar que a aplicação da equação em escala de bacias hidrográficas requer ressalvas, pois os resultados de perda de solos não podem ser considerados como taxas reais de erosão.

Apesar de todas essas limitações, a USLE é avaliada como uma das principais referências em estudos de perda de solo e tem sido uma ferramenta largamente empregada para auxiliar no planejamento e conservação das terras. Entre os estudos da USLE associada com SIG desenvolvidos no Brasil, estão os elaborados por Stein *et al.* (1987), Chaves (1994), Silva (2004), Costa (2005), Tomazoni e Guimarães (2005), Batalha (2006), Farinasso *et al.* (2006), Ruhoff (2005), Ribeiro e Alves (2007), Mata *et al.* (2007), Borges (2009), Miguel (2010), Lanza (2011), Gómez (2012), Rocha (2013). Retomamos, então, a equação

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

para, em seguida, abordar cada um de seus fatores.

3.1.1 Fator de Erosividade (R)

Segundo Carvalho (1994), o fator erosividade da chuva (R) representa a competência da chuva em ocasionar erosão em uma área sem proteção, sendo também conhecido como “índice de Wischmeier”. Ele representa toda ação erosiva gerada pelo impacto, salpico e a turbulência combinada com a enxurrada que transporta o sedimento desprendido.

Quanto maior a intensidade da chuva, maior é a erosão laminar (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012). Segundo dados obtidos por Suarez Castro (1979), para uma chuva com o total de 21 mm, uma intensidade de 7,9 mm/h gera um perda de material

cem vezes maior que uma intensidade de 1 mm/h. Já a duração da precipitação é o complemento da intensidade: a combinação de ambos define a chuva total. Quando inicia uma chuva de intensidade uniforme, a água se infiltra por um período mais ou menos longo, dependendo das condições de umidade do solo e da sua intensidade. Posteriormente, inicia a enxurrada, que aumenta de volume em proporções cada vez menores até alcançar uma quantidade estável (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Geralmente a erosividade é determinada através do cálculo do EI_{30} , que segundo Carvalho (1994) é o produto da energia cinética da chuva (E_c) pela sua máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}).

A energia das gotas de chuva é uma energia decorrente do movimento, calculada, segundo Foster *et al.* (1981) como:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log I$$

Onde:

E_c = energia cinética (MJ/ha-mm)

I = intensidade da chuva (mm/h)

Os valores de intensidade máxima em trinta minutos são computados através dos diagramas de pluviógrafos. O índice de erosão EI_{30} é obtido pela equação:

$$EI_{30} = E_c \times I_{30}$$

Onde:

EI_{30} = índice de erosão (MJ/há x mm/h)

E_c = energia cinética da chuva

I_{30} = intensidade máxima da chuva em 30 minutos (mm/h)

O somatório dos valores de EI de cada chuva, separadamente, em determinado período, proporciona uma estimativa numérica da erosividade da chuva dentro daquele período. Por fim, a soma de todos os valores de EI – para chuvas maiores que 10 mm ou menores, mas que proporcionam consideráveis perdas de solo –, em um ano em

determinado local, determinará o valor anual de EI (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

A escassez de registros de pluviógrafos, cujos diagramas são de difícil análise para o cálculo da energia cinética, contribuiu para que diversos autores tentassem relacionar o índice de erosão a fatores climáticos de mais fácil medida, que não demandem registros de intensidade de chuva (LOMBARDI NETO e MOLDENHAUER, 1992).

Nesse sentido, Lombardi & Moldenhauer (1992), Silva (2004), Moreira *et al.* (2007) Bertoni e Lombardi Neto (1985) utilizaram técnicas de interpolação para estimar a erosividade de diversas localidades do Brasil em diversas escalas. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), a condição ideal para a estimativa é a utilização de 20 anos de registros de precipitação, mas Silva (2004) considera que é possível determiná-la usando registros de apenas 10 anos.

Com o auxílio de redes neurais artificiais (RNAs) Moreira *et al.* (2007) estimou os valores mensais de erosividade para todo o estado de Minas Gerais. A RNA é uma estrutura computacional desenvolvida para simular o funcionamento do cérebro humano, adquirindo conhecimento por meio de um processo de treinamento, a fim de encontrar pesos para as diferentes conexões (parâmetros livres w 's e b 's) entre os elementos processadores da rede, denominados neurônios artificiais (PERSSON *et al.*, 2002 apud MOREIRA *et al.*, 2007).

Na avaliação das RNAs desenvolvidas, foi utilizado, além do coeficiente de determinação (R^2), o índice de confiança (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), o qual foi calculado pelo produto do coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância (d) (WILLMOTT: 1981). Concluiu-se, pois, que as RNAs criadas permitem estimar a erosividade mensal da chuva, constituindo alternativa viável para a interpolação desses valores no estado de Minas Gerais.

Assim Moreira *et al.* (2008) desenvolvem o NetErosividade MG, que disponibiliza de forma ágil e simples os valores mensais e anual da erosividade da chuva para qualquer localidade do estado de Minas, possibilitando sua utilização por técnicos e pesquisadores em atividades que contribuam para a conservação do solo.

3.1.2 Fator Erodibilidade (K)

A erodibilidade do solo (K) é a relação entre a intensidade de erosão e a erosividade da chuva, para um solo específico mantido continuamente sem cobertura. Representa a susceptibilidade do solo à erosão, da mesma forma que também representa a resistência à erosão. (CARVALHO, 1994)

O fator de cada solo depende de suas propriedades intrínsecas, principalmente as de ordens físicas e químicas. (WISCHMEIER & SMITH, 1978). As propriedades físicas exercem diferentes influências na resistência do solo contra a erosão, entre elas a estrutura, a textura – que compreende o agrupamento das partículas em classes conforme o tamanho –, a taxa de infiltração, a permeabilidade, a densidade e a porosidade (SILVA *et al.*, 2003). Dentre essas, as mais expressivas e que estão mais intensamente relacionadas à erodibilidade são a capacidade de infiltração e a estabilidade estrutural (BRADY E WEIL, 2002 *apud* SILVA e ÁLVARES, 2005). Com relação às características químicas, o conteúdo de matéria orgânica é o mais importante, porém sua relação é mais significativa para solos de textura mais arenosa (WISCHMEIER e MANNERING, 1969)

A difusão da equação USLE intensificou as pesquisas referentes ao fator erodibilidade com o auxílio de simuladores de chuva que possibilitaram obter, em curto período de tempo, enorme número de dados. (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012) Afinal, a erodibilidade apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal, elucidada pela diversidade climática, que calha no potencial erosivo das chuvas, e a variabilidade de solo, que influencia na susceptibilidade à erosão (BERTOL *et al.*, 2002).

Existem três modos distintos de se determinar a erodibilidade do solo. O primeiro consiste em determinar o fator K em condições de campo, sob chuva natural; no entanto, esse método é demorado. O segundo é semelhante ao primeiro, contudo se fundamenta na quantificação do fator K em razão das perdas do solo e do fator erosividade, sob condições de chuva simulada. Esses dois métodos são considerados padrão e refletem a erodibilidade do solo como é preconizada na Equação Universal de Perda de Solo (USLE), e são denominados de determinação direta. O terceiro método é fundamentado em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo ou a relações desses

correlacionados com o fator K obtido pelos métodos padrão (SILVA *et al.*, 2000), e é denominado de determinação indireta.

A determinação indireta do fator erodibilidade desenvolvido por Wischmeier e Mannering (1969), Wischmeier *et al.* (1971) e Romkens *et al.* (1977) não se mostraram adequados quando aplicados em solos tropicais (SILVA *et al.*, 1999), devido às diferenças de textura apresentadas pelos solos, principalmente aos latossolos brasileiros. Isso causa uma grande heterogeneidade de comportamento dos solos tropicais com relação aos processos erosivos (EL-SWAIFY e DANGLER, 1977 *apud* SILVA *et al.*, 1999)

Desse modo, diversos autores buscaram definir a erodibilidade de diversas localidades do Brasil e em diversas escalas. Portanto, para determinar o fator K no presente trabalho, foram reunidos os resultados obtidos em diversas pesquisas desenvolvidas em solos do Brasil com unidades pedológicas semelhantes à da área de estudo, que possui quatro tipos de unidade pedológica: Cambissolo, Latossolo, Argissolo e Neossolo.

Dessa forma, Silva *et al.* (2000) e Denardin (1990) desenvolveram um trabalho de determinação indireta dos índices de erodibilidade dos Latossolos brasileiros e avaliaram a correlação destes índices padrões obtidos de maneira direta com coletores de chuva natural ou com simuladores de chuva. Já Silva *et al.* (2009) determinou a erodibilidade e o limite de tolerância de perdas de solo em Cambissolos Háplicos Tb distrófico típico e Latossolo Vermelho distrófico típico, sob chuva natural, na região de Lavras, sul do estado de Minas Gerais. Eduardo *et al.* (2013) determinaram o fator de erodibilidade de Argissolo Vermelho-Amarelo sob condições de chuva natural em uma área experimental localizada no município de Seropédica, no estado do Rio de Janeiro. Lombardi Neto e Bertoni (1975) estudaram 66 perfis de solo para dois agrupamentos de solos localizados no estado de São Paulo. Bertoni *et al.* (1975) determinaram para um latossolo Roxo localizado em Campinas um valor de 0,0122 para o fator K, alcançado através de dados experimentais, cujas condições-padrão requeridas foram observadas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

3.1.3 Fatores Comprimento do Declive (L) e Grau do Declive (S)

O fator topografia do relevo, representado pela declividade e comprimento do terreno, possui fundamental influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade de material carregado pela erosão hídrica estão sujeitos à velocidade com que escorre, e essa velocidade é um produto do comprimento do lançante e do grau de declividade do terreno (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012)

O comprimento da rampa é uma característica topográfica que possui muita influência nas perdas de solo por erosão. Embora as perdas de água diminuam com o comprimento da rampa, devido ao maior caminho percorrido pelo escoamento superficial e, conseqüentemente, maior possibilidade de infiltração, a velocidade aumenta em razão do movimento uniformemente acelerado. Esta, por sua vez, aumenta a competência de transporte de sedimentos, de forma a aumentar também a perda de solo (BERTONI, 1959).

Da mesma forma, a declividade do terreno influencia a quantidade de perda de solo por erosão, pois dela dependem o volume e a velocidade das enxurradas. Quanto mais declivoso o terreno, maior é a velocidade do escoamento, conseqüentemente, menor é a taxa de infiltração, aumentando, assim, o escoamento superficial (BERTONI, 1959). Respectivamente representados por L e S, os dois fatores foram analisados separadamente na construção da equação universal de perda de solo. Porém, na aplicação prática da equação, os dois fatores foram considerados como um único fator, o fator topográfico, ou LS (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

A taxa da erosão hídrica é o produto da distância em que se estabelece o escoamento superficial e da declividade do terreno. O fator concebe a relação entre as perdas de solo em uma área com declividade e comprimento de encosta quaisquer e as perdas que ocorrem em uma parcela unitária padrão, com 22,1 m de comprimento e 9% de declividade (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Assim, fundamentalmente, esse fator foi acurado para segmentos de declives uniformes e não muito acentuados (SILVA, 2003). Determinar o valor de L e S considerando complexidades referentes à morfologia do declive (reto, côncavo, convexo ou uma combinação de ambos) trouxe aos pesquisadores o desafio de propor, por meio de equações matemáticas, o comportamento desses fatores e condições distintas (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Um desses novos meios de descrição foi a incorporação do conceito de área de contribuição, acarretando uma nova forma de se estimar o comprimento da rampa. Assim, não apenas o comprimento da vertente é considerado, mas toda a sua área de contribuição, a montante que drena para um determinado ponto, ou pixel. Dessa forma, o fluxo acumulado e a convergência/divergência do escoamento são inseridos, ao contrário de apenas o fluxo único retilíneo, representando melhor o fluxo superficial e o curso da erosão. Isso promove, então, mais acurasse a modelagem dos processos erosivos provenientes da erosão laminar sobre a topografia (DESMET e GOVERS, 1996; TARBOTON, 1997; FREITAS *et al.*, 2007).

Partindo dessa nova perspectiva de adoção do conceito de área de contribuição, Quinn *et al.*, (1991), Desmet e Goovers (1996) e Tarboton (1997) sugeriram algoritmos para o cálculo automático do fator. As metodologias foram elaboradas para serem desenvolvidas em ambientes de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando ferramentas de geoprocessamento sobre produtos de Sensoriamento Remoto, baseado principalmente em Modelos Digitais de Terreno (MDT). A substituição do conceito de comprimento de rampa pelo de área de contribuição foi o principal avanço advindo da implantação do SIG no cálculo do fator L, além da eficiência e agilidade que esse método automático proporciona na obtenção dos resultados (LANZA, 2011).

3.1.4 Fator Cobertura e Manejo (C) e Prática Conservacionista (P)

A vegetação é a proteção natural do solo contra a ação erosiva da água, logo da erosão hídrica. As implicações básicas sobre os efeitos da cobertura vegetal podem ser assim classificadas: (a) proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; (b) dispersão da água, interceptando e evaporando as gotas de chuvas, antes que elas alcancem o chão; (c) decomposição das raízes das plantas que, formando canalículos no solo, aumentam a infiltração da água; (d) aumento da capacidade de retenção de água, melhorando a estrutura do solo pela adição de matéria orgânica; (e) redução da velocidade do escoamento superficial pelo aumento do atrito (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Quando a chuva precipita em um terreno coberto por vegetação espessa, a gota de água se divide em diversas gotículas, diminuindo, assim, sua força de impacto, ou sua energia cinética. Quando não há nenhuma cobertura, a gota faz desprender e salpicar as

partículas de solo, que posteriormente são facilmente transportados pela água vertente a baixo, cumprindo as funções da água no processo erosivo: desprender, transportar e depositar. Por isso, em uma área descoberta, as perdas de solos serão um produto de todos os termos da equação universal de perda de solo descrito anteriormente R, K, L, S; no entanto, se houver algum tipo de cultura na área, as perdas serão reduzidas devido à proteção proporcionada ao solo (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

O fator de uso e manejo do solo (C) é a relação entre as perdas de solo de um terreno com um determinado tipo de cobertura e as perdas correspondentes de um terreno conservado continuamente descoberto, assim, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado. (SILVA, SCHULZ e CAMARGO, 2003)

Já o fator prática conservacionista (P) é a relação entre a intensidade esperada de perdas com determinada prática conservacionista e aquelas de quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo). (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012) A prática significa o tipo de tecnologia adotada no terreno como, por exemplo, terraceamento ou plantio em nível.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) trabalham os dois fatores de maneira dissociada: o fator C apenas como “uso e manejo” e o fator P como “prática conservacionista” (MATA *et al.*, 2007). Todavia, para Wischmeier e Smith (1978), os fatores C e P estão significativamente relacionados, por isso não devem ser analisados separadamente. O efeito combinado das variáveis cobertura e manejo do solo é representado pelo fator CP.

Stein *et al.* (1987) classificaram os valores de CP em função do tipo de ocupação e do porte e densidade da cobertura vegetal. Analisando a Tabela 1, observa-se que existem duas importantes divisões: grupo e categoria. Os grupos estão relacionados ao porte e ao grau de cobertura proporcionado pelo tipo de vegetação ou cultura agrícola, que estão apontadas na coluna categoria. A vegetação de grande a médio porte detém baixo valor de CP e quanto menor o porte da vegetação e o grau de cobertura, maior a perda de solo e conseqüentemente os valores do fator. Para as ocupações antrópicas diversas e os corpos de água, o valor de CP é nulo.

TABELA 1: Fator CP da EUPS para alguns tipos de cobertura do solo

GRUPO	CATEGORIA	CP
1. Vegetação de porte alto a médio, cobertura total do terreno	1a. Floresta	0,00004
	1b. Vegetação secundária	0,00004
	1c. Cerradão	0,00004
	1d. Reflorestamento	0,0001
2. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura total do terreno	2a. Cobertura residual	0,0007
	2b. Cerrado	0,0007
	2c. Cultura permanente	0,02
	2d. Cana-de-açúcar	0,05
3. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno	3a. Cobertura residual	0,25
	3b. Cultura perene	0,25
4. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura total do terreno	4a. Cobertura residual	0,01
	4b. Pastagem	0,01
	4c. Cultura temporária	0,20
	4d. Campo cerrado	0,01
	4e. Campo natural	0,01
5. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno	5a. Cobertura residual	0,10
	5b. Pastagem	0,10
	5c. Cultura temporária	0,20
6. Ocupações naturais diversas	6a. Várzea	0
	6b. Espelho d'água	0
7. Ocupações antrópicas diversas	7a. Área urbanizada	0
	7b. Estrada	0

Fonte: STEIN *et al.*, 1987

Segundo Stein *et al.* (1987), o cálculo do fator C foi baseado na sistemática de Bertoni e Lombardi Neto (1985), que também considera o plantio, colheita, preparo do solo e manejo dos restos culturais. Devido à dificuldade em obter o fator P com detalhamento em grandes bacias, Stein *et al.* (1987) adotaram $P = 1$, que representa a pior situação possível de práticas conservacionistas. A utilização dessa abordagem resulta valores

exagerados de CP, contudo representa uma aproximação adequada para a aplicação regional com a utilização de imagens do sensoriamento remoto.

3.2 Zoneamento ecológico-econômico – vulnerabilidade à perda de solo

O surgimento da sociedade industrial moderna acelerou o processo de formação e crescimento dos centros urbanos. Assim o zoneamento passou a ser utilizado de maneira mais sistemática na tentativa da ordenação da ocupação e uso do espaço. Inicialmente ele foi aplicado na organização da distribuição das atividades intraurbanas, desdobrando-se, então, para a zona rural, a partir da criação dos parques e reservas, bem como do ordenamento da agricultura. Em seguida, surgiram os zoneamentos setoriais, destinados a organizar atividades específicas, fazendo o uso das mais diversas nomenclaturas: zoneamento industrial, de recursos minerais, de áreas de proteção, de recursos florestais etc (MMA, 2006).

No começo da década de 80, a Política Nacional Do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981) foi instituída com o objetivo de preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental propícia à vida e estabeleceu entre seus nove instrumentos de execução, logo no item II, o zoneamento ambiental. Paralelamente, era concebida a ideia de uma Amazônia com processo de desenvolvimento compatível com diretrizes ecológicas e econômicas. Essa ideia foi intensificada por meio do Programa de Meio Ambiente e Comunidades Indígenas (PMACI), vinculado ao Ministério do Interior, e do Programa Grande Carajás, vinculado à Secretaria de Planejamento da Presidência da República, através do projeto Ordenamento Territorial em Áreas Específicas. (DEL PRETTE e MATTEO, 2006).

Nesse período, algumas iniciativas avulsas de zoneamento ambiental foram realizadas por órgãos em diversos níveis de governo. Inicialmente, houve um processo de criação de Áreas de Proteção Ambiental (APAs), uma nova categoria de Unidade de Conservação, posteriormente incorporada ao Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), cuja regulamentação passou a utilizar o zoneamento (Lei 9.985/2000).

O Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (Lei 7.661/1988) também citou o zoneamento na Zona Costeira como ferramenta de gestão e, posteriormente, o Grupo de Coordenação para elaboração e atualização do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, criado pelo Decreto 96.660/1988, recomendou a formulação de normas para zoneamento e monitoramento da Zona Costeira.

Observa-se, então, que, desde a década de 80, preocupações atreladas ao zoneamento surgiram a partir dessas demandas. Neste contexto, o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) foi estabelecido como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente pelo Decreto 4.297/2002. Nele é posto que sua finalidade seja o ordenamento territorial, orientando o desenvolvimento econômico de forma planejada, compatível e sustentável com as potencialidades do patrimônio ambiental e sociocultural de determinado espaço geográfico.

Conforme Nitsch (1998), o ZEE foi estabelecido para ser um instrumento técnico e político de planejamento com o intuito de otimizar o uso dos espaços e das políticas públicas. É instrumento técnico de informação integrada sobre o território uma vez que o categoriza segundo suas vulnerabilidades e potencialidades. É instrumento político de regulação do território porque favorece a integração de políticas públicas em uma base geográfica e contribui para a negociação entre as esferas de Governo; entre essas, o setor privado e a sociedade. Em suma, é uma ferramenta técnica, econômica, política e jurídica, de relativo destaque no planejamento, reconhecida entre as esferas do setor público, privado e sociedade civil, por promover a construção de parcerias na busca da igualdade e por considerar o uso do território como interesse de todas as classes sociais e segmentos econômicos.

Segundo Gomes (2000), o governo buscou desenvolver uma metodologia para possibilitar a gestão do território. Depois de alguns encontros entre a Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Institutos de Pesquisas e Universidades, conclui-se que, para alcançar o objetivo do zoneamento, seria imprescindível uma análise do meio físico e biótico, para gerar uma carta de vulnerabilidade à perda de solo (CREPANI *et al.*, 1996), e outra da socioeconomia, para produzir a carta de potencial social (BECKER e EGLER, 1997).

A metodologia elaborada para a construção da carta de vulnerabilidade à perda de solo foi desenvolvida a partir do conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977), potencializado pelos produtos de sensoriamento remoto nos estudos integrados. Segundo Crepani *et al.* (2001), para o tratamento digital das imagens utilizadas como “âncora” nessa metodologia, edição dos Planos de Informação, bem como montagem e manipulação do banco de dados que a acompanha, utilizou-se o software, Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING desenvolvido no INPE (INPE, 2001).

O autor francês Tricart (1977), em sua obra *Ecodinâmica*, desenvolveu o conceito de Unidades Ecodinâmicas, fundamentando-se no instrumento lógico de sistema, focando nas relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e os fluxos de energia/matéria no meio ambiente. O autor classifica os meios ambientes usando a escala de vulnerabilidade como estáveis, intergrades e instáveis, de modo a estabelecer as seguintes categorias morfodinâmicas:

- Meios estáveis:
 - cobertura vegetal densa;
 - dissecação moderada;
 - ausência de manifestações vulcânicas.
- Meios intergrades:
 - balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas.
- Meios fortemente instáveis:
 - condições bioclimáticas agressivas, com ocorrências de variações fortes e irregulares de ventos e chuvas;
 - relevo com vigorosa dissecação;
 - presença de solos rasos;
 - inexistência de cobertura vegetal densa;
 - planícies e fundos de vales sujeitos a inundações;
 - geodinâmica interna intensa.

Fundamentados nesses princípios, Crepani *et al.* (1996) desenvolveram critérios que possibilitaram a criação de um modelo que busca a avaliação, de forma empírica, do estágio de evolução morfodinâmica da unidade de paisagem, nomeada Unidade Territorial Básica (UTB). Desta forma, os valores de estabilidade foram atribuídos às categorias morfodinâmicas, segundo a tabela 2. Nessa interpretação, quando predomina a morfogênese, prevalecem os processos erosivos, modificadores do relevo; já quando a predominância é a pedogênese, prevalecem os processos formadores de solo.

TABELA 2: Vulnerabilidade das unidades de Paisagem Natural

Categoria Morfodinâmica	Relação Pedogênese/Morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Tricart, (1977)

Para a análise de uma unidade de paisagem natural, é fundamental a ciência de sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, bem como o tipo de cobertura vegetal existente. As informações necessárias para essa análise são fornecidas pela geologia, geomorfologia, pedologia e cobertura vegetal e precisam ser integradas para que se possa alcançar o diagnóstico do comportamento de cada unidade frente a sua ocupação. Por fim, é indispensável o auxílio da climatologia para se conhecer algumas características climáticas da região onde se encontra a unidade de paisagem, a fim de que se preveja seu comportamento frente às alterações atribuídas pela ocupação (CREPANI *et al.*, 1996).

A contribuição da geologia na análise e definição morfodinâmica das unidades de paisagem natural abrange as informações referentes ao grau de coesão das rochas que a compõem, providas pela mineralogia e petrologia, e as informações referentes à cronologia da evolução do seu ambiente cronológico, fornecidas pela tectônica e pela geologia estrutural. Por grau de coesão das rochas, entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as compõem. O nível de coesão das rochas é a informação principal da geologia a ser associada a partir da morfodinâmica, dado que, em rochas de pouca coesão, prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto, nas rochas bastante coesas, prevalecem os processos de formação do solo (CREPANI *et al.*, 1996).

O subsídio oferecido pela geomorfologia na caracterização da estabilidade das unidades de paisagem natural são as informações referentes à morfometria que influenciam os processos ecodinâmicos. As informações morfométricas utilizadas são a amplitude de relevo, a declividade e o grau de dissecação da área. Elas permitem que se quantifique, de maneira empírica, a energia potencial disponível para o “*runoff*”, portanto, a transformação da energia potencial em energia cinética responsável pelo transporte de materiais que modelam as formas de relevo. Assim, entende-se que valores altos de amplitude do relevo, declividades e grau de dissecação apresentam processos morfogenéticos, enquanto que baixos valores apresentam os processos pedogenéticos (CREPANI *et al.*, 1996).

A pedologia oferece o indicador fundamental da posição da área dentro da escala gradativa da Ecodinâmica: a maturidade do solo. A maturidade do solo é produto direto do balanço morfogênese/pedogênese; ele indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese que geram solos jovens e poucos desenvolvidos ou se as condições de estabilidade possibilitariam o predomínio dos processos de pedogênese, gerando solos maduros, lixiviados e bem desenvolvidos (CREPANI *et al.*, 1996).

A cobertura vegetal e uso do solo representam a defesa da unidade de paisagem contra os efeitos dos processos erosivos. A atuação da cobertura na proteção do solo se dá de inúmeras maneiras: I) impede o efeito *splash* da gota de água no solo, que, segundo Guerra (2009), é o impacto das gotas de chuva na superfície e o estágio inicial do processo erosivo; II) impede a compactação do solo, que diminui a capacidade de absorção da chuva; III) aumenta a capacidade de infiltração do solo pela difusão do fluxo de água de chuva; IV) dá suporte à vida silvestre que, pela presença de estruturas biológicas como raízes de plantas, perfurações de vermes e buracos de animais, aumenta a porosidade e a permeabilidade do solo.

Por fim, cabe à cobertura um papel de destaque no trabalho de retardar o ingresso das águas das precipitações pluviais nas correntes de drenagem, pelo aumento da capacidade de infiltração. A entrada imediata causa incremento do *runoff*, logo aumenta a capacidade de erosão e transporte de partículas (CREPANI *et al.*, 2008).

Dessa forma, a utilização do fator cobertura vegetal e do solo na morfodinâmica das unidades de paisagem está diretamente atrelada a sua capacidade de proteção. Portanto

aos processos morfogenéticos relacionam-se as coberturas vegetais de baixa densidade, ao passo que o processo pedogenético acontece em cenários onde a cobertura vegetal do solo é mais densa, permitindo o desenvolvimento e maturação do solo.

As informações climatológicas representam o contraponto do papel de proteção do terreno exercido pela cobertura do solo. Segundo Crepani *et al.* (2008), as características fundamentais da chuva envolvidas nos processos erosivos são: pluviosidade, intensidade pluviométrica e distribuição sazonal da precipitação, sendo que a intensidade pluviométrica representa uma relação entre as outras duas características (quanto chove/quando chove). Essa informação determina a quantidade de energia potencial disponível para ser transformada em energia cinética.

Após a conclusão dessa etapa, é feita uma classificação do grau de vulnerabilidade de cada unidade territorial baseada nos processos de morfogênese e pedogênese. Como se observa na tabela 3, a vulnerabilidade é expressa pela atribuição de valores (de 1 a 3, num total de 21 valores) para cada unidade de paisagem. Com esse método é possível elaborar cartas de vulnerabilidade natural à perda de solo a partir de um banco de dados contendo as informações básicas do meio físico e de uso da terra de uma determinada região (CREPANI *et al.*, 2001).

TABELA 3: Escala de vulnerabilidade das unidades de paisagem natural

UNIDADE DE PAISAGEM	MÉDIA		GRAU DE VULNERABILIDADE	GRAU DE SATURAÇÃO			
				VERM.	VERDE	AZUL	CORES
U1	↑ VULNERABILIDADE	3,0	VULNERÁVEL	255	0	0	
U2		2,9		255	51	0	
U3		2,8		255	102	0	
U4		2,7		255	153	0	
U5		2,6	MODERADAMENTE VULNERÁVEL	255	204	0	
U6		2,5		255	255	0	
U7		2,4		204	255	0	
U8		2,3		153	255	0	
U9		2,2	MEDIANAMENTE ESTÁVEL/ VULNERÁVEL	102	255	0	
U10		2,1		51	255	0	
U11		2,0		0	255	0	
U12		1,9		0	255	51	
U13		1,8	MODERADAMENTE ESTÁVEL	0	255	102	
U14		1,7		0	255	153	
U15		1,6		0	255	204	
U16		1,5		0	255	255	
U17		1,4	ESTÁVEL	0	204	255	
U18		1,3		0	153	255	
U19		1,2		0	102	255	
U20		1,1		0	51	255	
U21		1,0		0	0	255	

Fonte: Crepani *et al.* (1996)

Crepani (2015) afirma que a participação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na idealização do Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia resultou nos treinamentos de equipes dos estados da Amazônia legal (CREPANI *et al.*, 1996). A partir de então, outras áreas do Brasil e da América do Sul passaram a utilizar princípios dessa metodologia. Entre os estudos desenvolvidos no Brasil estão os elaborados por Gomes (2000), Menezes *et al.* (2007), Ribeiro e Campos (2007), Albuquerque (2009), Arnesen *et al.* (2009), Mesquita *et al.* (2010), Mota e Valadares (2011), Oliveira *et al.* (2011), Quartoli *et al.* (2013).

É notório que a metodologia de mapeamento da vulnerabilidade à perda de solo desenvolvida por Crepani *et al.* (1996) com o objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico foi o método desenvolvido no Brasil mais difundido, mas

também é importante salientar que existem outras metodologias desenvolvidas com a mesma finalidade. Dessas, vale destacar a corrente baseada na lógica difusa, ou lógica *fuzzy*. Segundo Silva (2001), essa lógica foi idealizada para analisar as regiões onde se instalam as incertezas, como também em regiões não ambíguas. Segundo Mcbratney e Odeh (1997) a aplicação dessa lógica se faz necessária devido à complexidade comum do sistema edáfico, cuja aplicação de modelos é geralmente caracterizada pela existência de múltiplos e, às vezes, conflituosos atributos.

Ruhoff *et al.* (2005) comenta o procedimento, em que diferentes fatores são comparados entre si a partir de um critério de importância relativa, segundo uma escala pré-definida, que varia de 1 a 0 (Igual Importância – Máxima Importância). Esse tipo de análise espacial representa valores contínuos, cujos dados são transformados para o espaço de referência [0 ... 1] e processados por combinação numérica ou inferência *fuzzy*.

Devido ao potencial da modelagem *fuzzy* nos processos de avaliação de potencial de erosão do solo, numerosas aplicações foram desenvolvidas nesse âmbito. Dessas podemos citar Melendez-Pastor *et al.* (2006), que propuseram um modelo baseado em geoprocessamento e considerando os fatores cobertura do solo, tipo de solo e relevo. Em outra relevante aplicação, Metternicht e Gonzalez (2005), também subsidiados pelo SIG, consideraram os fatores cobertura do solo, fragmento rochoso, textura do solo e declividade.

No âmbito nacional, Alves, Souza e Marques (2005) aplicaram a modelagem *fuzzy* numa análise comparativa do potencial à erosão da Lógica Fuzzy e o método USLE. Neste, os autores ponderaram apenas os fatores cobertura e declividades na modelagem difusa em contraponto ao USLE. Já Ruhoff *et al.* (2005) estabeleceram uma proposta de zoneamento ambiental fundamentado em geoprocessamento e utilizando dos fatores geologia, pedologia, uso do solo e declividades. Paula e Souza (2007) seguiram o mesmo caminho de Ruhoff *et al.* (2005), apenas trocando o fator pedologia pelo litologia. É importante frisar que as duas aplicações anteriores foram baseadas na proposta de zoneamento ambiental sugerida por Ross (1994), em Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados.

Ross (1994), também fundamentado em Tricart (1997), criou dois procedimentos para confecção do Mapa de Fragilidade dos Ambientes Naturais: o primeiro denominado de

Modelo de Fragilidade Potencial Natural com Apoio nos índices de Dissecação do Relevo e o segundo, Modelo de Fragilidade Potencial Natural com Apoio nas Classes de Declividade. Nesses procedimentos, demonstra-se que a análise de fragilidade exige conhecimentos referentes ao relevo, solos, cobertura vegetal e uso e clima. Para a caracterização do relevo, o autor destaca que, para as escalas médias e pequenas, devem-se utilizar os índices de dissecação do relevo e, em escalas grandes, as formas das vertentes e classes de declividade. Para o estudo dos solos, criou-se uma tabela contendo as classes de fragilidade dos solos, que apresenta valores para a sua erodibilidade. A análise de uso do solo e cobertura vegetal deve ser feita pela interpretação de imagens de satélite e fotografias aéreas, além da tabela de graus de proteção do solo pela cobertura vegetal.

Comparando a construção das metodologias, observa-se que a única diferença entre a metodologia de Ross (1994) e Crepani *et al.* (1996) foi a ausência, na primeira, do fator geologia. Com relação aos pesos das variáveis, Ross (1994) propõe que cada uma delas seja hierarquizada em cinco classes de acordo com a vulnerabilidade. As variáveis mais estáveis apresentaram valores mais próximos de 1,0, as intermediárias ao redor de 3,0 e as mais vulneráveis próximas de 5,0. Já segundo Crepani *et al.* (1996), cada um desses temas recebe uma pontuação de fragilidade variando entre 1 e 3. Dessa forma, as unidades mais estáveis apresentam valores mais próximos de 1,0, as intermediárias ao redor de 2,0 e as unidades de paisagem mais vulneráveis estão próximas de 3,0.

De acordo com Spörl e Ross (2004), os resultados dos três modelos apresentam divergências. O modelo proposto por Ross (1994), utilizando os índices de dissecação do relevo, apresentou quatro diferentes graus de fragilidade (fraca, média, forte e muito forte), enquanto o modelo usando as classes de declividade ofereceu cinco graus de fragilidade (muito fraca, fraca, média, forte e muito forte). Já a aplicação do modelo das UTBs, proposto por Crepani *et al.* (1996), apresentou apenas três diferentes graus de fragilidade (fraca, média e forte), conforme exposto no gráfico a seguir:

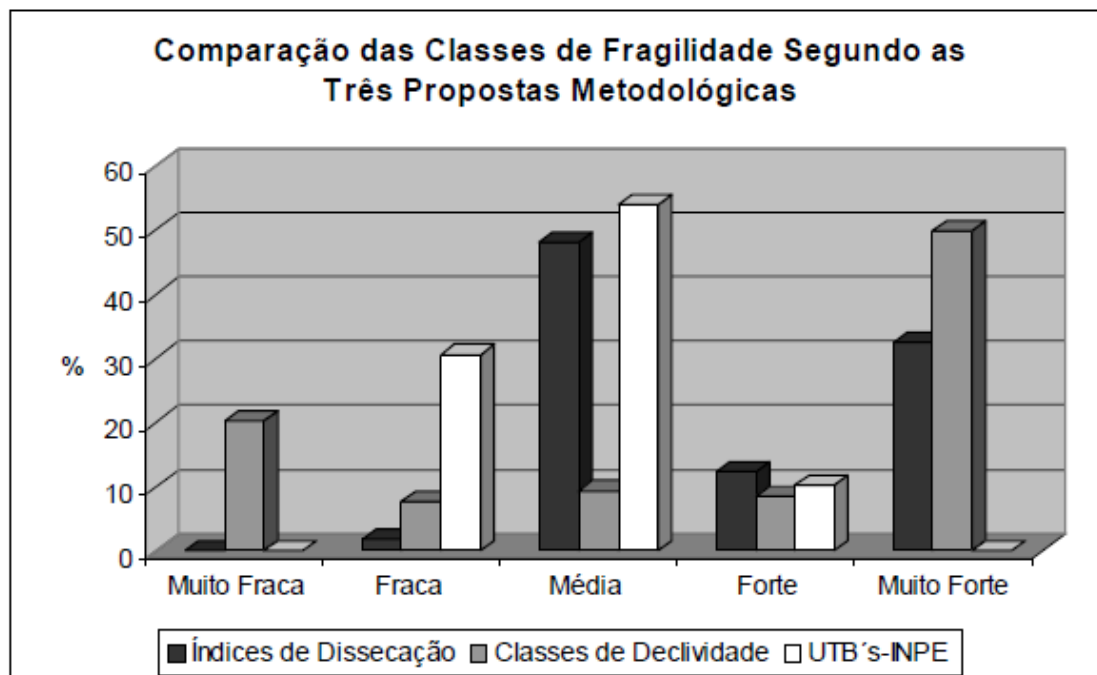


FIGURA 1: Gráfico de distribuição das classes de fragilidade segundo as três metodologias analisadas.

Fonte: SPÖRL ROSS, 2004

Retomando a carta de vulnerabilidade à perda de solo (CREPANI *et al.*, 1996, 2001), pode-se perceber que existe um ponto fundamental na sua aplicação e reprodução no contexto do ZEE: de acordo com Crepani (2015), nunca existiu a obrigatoriedade por parte do MMA de sua aplicação. Assim, todos os ZEEs executados posteriormente puderam adotar a metodologia que lhe fosse pertinente.

O ZEE-MG foi elaborado pelo estado de Minas Gerais, sob a coordenação da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA), através da Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, além de ter contado com a participação da fundação João Pinheiro para a sua execução (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2010). Logo, o produto oficial disponível no portal não é o Mapa de Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo elaborado por Crepani *et al.* (1996, 2001), mas sim dois produtos: Mapa de Risco Potencial de Erosão e Mapa de Vulnerabilidade dos Solos a Erosão.

O Mapa de Risco Potencial de Erosão é resultante da sobreposição da erodibilidade do solo com a declividade do terreno. A declividade foi obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e a erodibilidade foi obtida a partir da interpretação de mapas auxiliares e de teor de matéria orgânica e textura do solo, além do pedológico

simplificado, conforme tabela 4.1. A tabela 4.2 apresenta o quadro utilizado para converter as classes de erodibilidade do solo em risco potencial à erosão.

TABELA 4.1: Quadro-guia para estimativa da erodibilidade

ERODIBILIDADE	SOLO	TEXTURA	TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA
Muito baixa	Latossolo	Fina	Média ou Alta
	Gleissolo ou Neossolo Flúvico	-	-
Baixa	Latossolo	Média	-
	Argissolo	Fina	Alta
	Nitossolo	-	Alta
Média	Neossolo	-	Alta
	Argissolo	Fina	Média
	Argissolo	Média ou Grossa	Alta
	Nitossolo	-	Média
	Latossolo	Grossa	Média
Alta	Argissolo	Média ou Grossa	Média
	Neossolo Quartzarênico	-	Média
	Cambissolo	-	Alta
	Espodossolo	-	Média
Muito alta	-	-	Baixa
	Neossolo Litólico	-	-
	Cambissolo	-	Média
	Afloramento de Rochas	-	-

Fonte: ZEE-MG

TABELA 4.2: Quadro-guia para estimativa do risco de erosão.

RISCO DE EROSÃO	ERODIBILIDADE	DECLIVE
Muito baixo	Muito baixa ou baixa	Plano ou suave-ondulado
Baixo	Muito baixa	Ondulado
	Média	Plano ou suave-ondulado
Médio	Muito baixa	Forte-ondulado
	Baixa ou média	Ondulado
	Alta ou Muito alta	Plano ou suave-ondulado
Alto	Baixa ou Média	Forte-ondulado
	Alta	Ondulado
Muito alto	-	Montanhoso
	Alta	Forte-ondulado
	Muito alta	Ondulado ou forte-ondulado

Fonte: ZEE-MG

O Mapa de Vulnerabilidade dos Solos à Erosão foi determinado com base na combinação do Risco Potencial de Erosão, a intensidade da chuva e a exposição do solo ao impacto direto das gotas de chuvas, conforme o Apêndice A.

Nesse cenário de falta de uma unidade metodológica para a criação da carta de vulnerabilidade, o MMA (2006) orienta a fazer um esforço de análise e interpretação, estabelecendo os critérios científicos mais adequados para tanto. Responder quais são os fatores ecológicos limitantes à sustentabilidade e integridade em cada unidade natural e quais os setores sociais produtivos, bem como as interações e conflitos que mais influenciam positiva ou negativamente sobre a integridade das diferentes unidades naturais, constitui uma das mais importantes tarefas do diagnóstico. Essencialmente, não existe uma unidade entre as metodologias de vulnerabilidade, principalmente em quantos e quais seriam os fatores considerados no processo. Assim, é delicado estabelecer um contraponto entre a metodologia USLE e as demais.

Todavia, pode-se estabelecer um contraponto entre as metodologias de vulnerabilidade e a Equação Universal de Perda de Solo (USLE): como o modelo de avaliação da carta de vulnerabilidade foi baseado em cruzamentos ponderados de planos de informações, ele representa o fenômeno de forma conceitual; já os valores de cada fator responsável para a construção da USLE foram medidos em campo, trazendo-lhes menos subjetividade.

3.3 Paralelos entre a Equação Universal de Perda de Solo e a carta Vulnerabilidade dos Solos à Erosão do Zoneamento ecológico-econômico de Minas Gerais.

Segundo Suarez Castro (1979) a erosão é gerada por forças, como as propriedades da chuva, a declividade e o comprimento do declive, a capacidade do solo a resistir à ação erosiva da água e sua capacidade de absorção da precipitação e a densidade da cobertura vegetal.

De acordo com as considerações estabelecidas nos itens anteriores, é possível observar que, de maneira geral, os modelos são compostos dos mesmos fatores. Isto é, são ponderados os principais parâmetros que exercem influência no processo de erosão hídrica: chuva, solo, topografia e cobertura do solo. A Figura 02 apresenta os fatores que compõe os modelos USLE e a Carta de Vulnerabilidade do ZEE e suas equivalências.

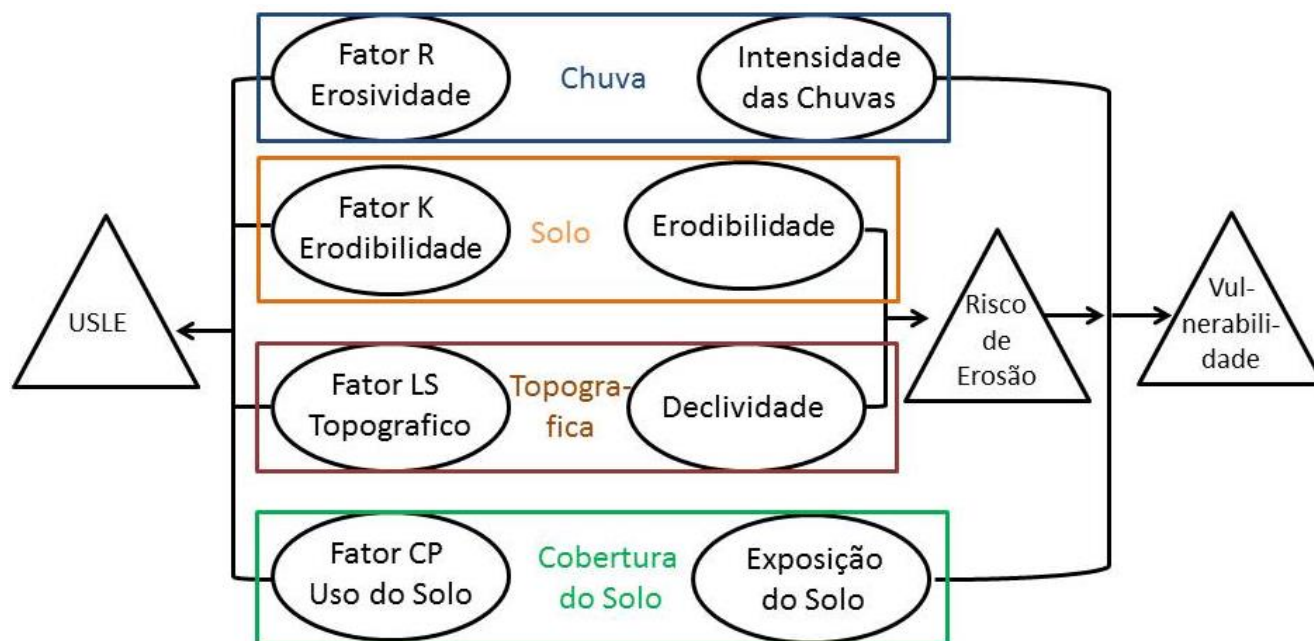


Figura 2: Fluxograma dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo e do Mapa de Vulnerabilidade do ZEE-MG

A água da chuva desempenha sua ação erosiva por meio do impacto das gotas que caem no solo. Na Equação Universal de Perda de Solo (USLE) a chuva é, resumidamente, abordada através do cálculo da energia cinética das gotas de chuva, pela sua máxima intensidade em trinta minutos. Este cruzamento representa, em valores numéricos denominados Erosividade, a capacidade da chuva em ocasionar erosão. Já a Carta de Vulnerabilidade dos Solos à Erosão pondera apenas a intensidade da chuva. Sabe-se que quanto maior a intensidade da chuva maior é a erosão laminar, porém a intensidade apresentada no zoneamento é uma análise qualitativa e pouco descritiva da intensidade de chuvas na escala do estado de Minas Gerais.

Analisando a forma de concepção deste fator entre os modelos, observa-se que a quantificação dos efeitos da chuva no modelo USLE é estabelecida segundo um conjunto de fórmulas que expressam numericamente valores que somado a outros

incidem em valores quantitativos de perda de solo. No ZEE, o fenômeno é representado em classes (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta) de forma qualitativa.

No que tange ao solo, Bertoni e Neto (2012) ponderam que cada tipologia pedológica é afetada pela erosão de forma distinta. As características físicas como estrutura, textura, permeabilidade e densidade exercem diferentes influências no processo erosivo. O produto referente ao fenômeno nos dois modelos é denominada erodibilidade.

Na Equação Universal existe forma direta e indireta de determiná-la, a direta é definir a erodibilidade em campo sob condições de chuva simulada ou natural. O método indireto é o usualmente aplicado, e é baseado em regressões que contém diversas variáveis relacionadas ao solo. No ZEE a erodibilidade é determinada com base na interpretação e cruzamento de três mapas auxiliares: teor de matéria orgânica do solo, textura do solo e mapa pedológico simplificado. O teor de matéria orgânica foi ordenado a partir de informações referentes ao horizonte superficial de cada unidade de mapeamento; a textura foi obtida diretamente no mapa de solos, de modo que a presença de cascalho foi considerada em termos de comportamento do solo; o mapa pedológico simplificado foi construído não considerando informações taxonômicas julgadas não relevantes para o objetivo do projeto.

Assim, a classificação da erodibilidade do solo na Equação Universal e ZEE é feita de forma indireta, contudo na USLE é determinada de forma quantitativa e no ZEE de maneira qualitativa. Cabe ressaltar que a forma apresentada no Zoneamento Econômico Ecológico foi estimada considerando itens que também são avaliados na USLE, como o teor de matéria orgânica e granulometria. Portanto, sua classificação representa o fenômeno de maneira cabível.

A topografia é um fator importante na erosão hídrica, uma vez que o tamanho e a quantidade de material transportado em suspensão pelo escoamento superficial dependem da velocidade com que ela escorre. E essa velocidade encontra-se intimamente relacionada ao comprimento da rampa e do grau de declividade do terreno.

O fator topográfico na USLE foi inicialmente idealizado considerando o comprimento e declividade de uma parcela de medidas pré-estabelecidas. Com o avanço da geotecnologia conceitos físicos de bacias hidrográficas, como área de contribuição, e

complexidades referente à morfologia começaram a ser contemplados na determinação do fator. A topografia é apresentada no ZEE de forma muito geral, sendo apenas classificada conforme seu relevo: plano, suave-ondulado, ondulado, forte-ondulado, montanhoso e escarpado.

Independente de ser mais completo no USLE que no ZEE, compreende-se que este é um parâmetro complexo de estabelecer valor ou conceito, principalmente quando trabalhado em escala de bacia hidrográfica. É notório que mesmo com os avanços tecnológicos no cálculo, a questão das complexidades morfológicas, como a forma do terreno (reto, côncavo, convexo, divergente e convergente) ainda é uma variável pouco explorada neste sentido. Contudo, a Equação Universal apresenta valores mais condizentes com a realidade do fenômeno.

A cobertura e uso do solo e a vegetação são as proteções contra a ação erosiva da água. Este parâmetro baseia-se em mapas de uso e cobertura do solo determinado a partir de imagens de satélite. Em ambas as metodologias o que as diferem uma da outra é apenas a classificação do uso perante o fenômeno erosivo, que por sinal são opostas muitas vezes.

Enfim, é plausível estabelecer que a diferença entre os modelos é fundamentalmente conceitual. É nítida a existência de diferenças na compreensão e mensuração de alguns parâmetros, porém, observa-se que a maneira de se conceber o fenômeno é a mesma, já que são compostos dos mesmos elementos. Sendo assim, o que pode diferenciar o resultado do modelo USLE em contraponto ao modelo existente no ZEE é a abstração do valor de cada elemento no fenômeno.

3.4 Variáveis geomorfológicas não consideradas pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE).

A análise morfométrica é o diagnóstico quantitativo da configuração dos elementos do modelado superficial que geram sua expressão e configuração espacial: o conjunto das vertentes e canais que compõem o relevo, sendo os valores medidos correspondentes aos atributos desses elementos. As análises de redes de drenagens podem trazer a compreensão e esclarecimento de inúmeras questões geomorfológicas, já que os cursos d'água constituem processos morfogenéticos dos mais ativos na esculturação da

paisagem terrestre. (CHRISTOFOLETTI, 1970). Também pode oferecer indícios da dinâmica e potencial dos processos erosivos existentes na bacia estudada.

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é essencialmente uma função das características climáticas e das características fisiográficas ou morfométricas da bacia (HIPÓLITO e VAZ, 2011). As análises fisiográficas são classificadas segundo o tipo de dados necessários para a geração do parâmetro. Assim, elas são classificadas como lineares, zonais e hipsométricas. (CAJAZEIRO, 2012).

A discussão de uma metodologia na qual fossem consideradas ao resultado da USLE variáveis geomorfológicas se mostrou plausível ante ao fato de que as informações geomorfológicas não são contempladas de forma eficaz na equação. Neste sentido, foram avaliadas as variáveis que pudessem agregar a análise do potencial erosivo de uma bacia hidrográfica.

Considerando que o sedimento erodido é efetivamente um problema quando transportado, concebe-se o juízo de que a variável mais condizente a ser aplicada neste contexto seria a Forma do Terreno. A forma do terreno trata-se da combinação variáveis geomorfométricas oriundas da altimetria, onde a curvatura vertical da vertente determina se ela é convexa/ côncava e a curvatura horizontal apresenta sua característica divergente ou convergente dos fluxos.

Como já citado, a curvatura vertical se expressa ao caráter convexo/côncavo do terreno analisado em perfil. (VALERIANO e CARVALHO JUNIOR, 2003). A curvatura horizontal faz referência à característica divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal. Esta variável está relacionada aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade, e desempenha papel importante sobre o balanço hídrico e também o equilíbrio entre os processos morfogênese e pedogênese (VALERIANO, 2003).

Assim, as classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo) são ajustadas para prover indicação da forma do terreno. (Figura 3)

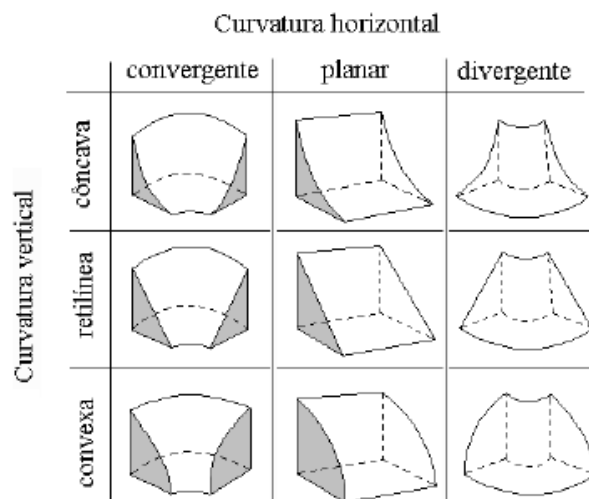


Figura 3: Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.
Fonte: Dikau (1990) APUD Valeriano (2008)

As classes de forma de terreno podem ser reagrupadas em função de sua semelhança diante a esses aspectos. Os casos extraordinários de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento). (Figura 4) As combinações intermediárias de curvatura horizontal plana, têm propriedades hidrológicas mais dependentes das relações entre as intensidades dos efeitos individuais (VALERIANO, 2008).

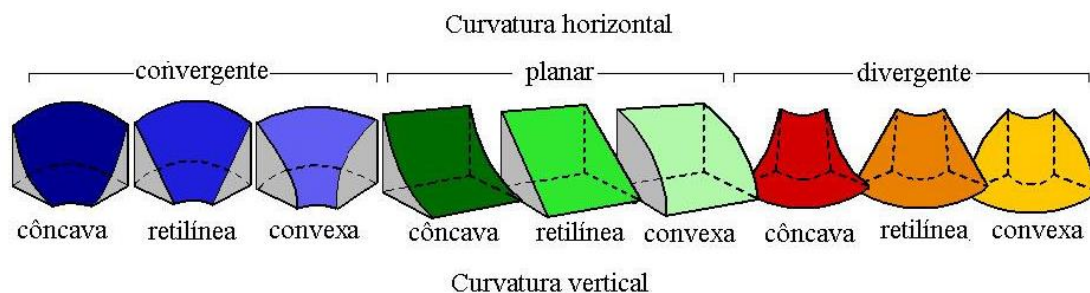


Figura 4: Classes de Forma de Terreno.
Fonte: Valeriano (2008)

4. METODOLOGIA

A realização da presente pesquisa baseou-se na utilização de informações de diversas naturezas e escalas, que só se tornaram acessíveis a partir da segunda metade da década de 90. O acesso às informações em meio digital tornou viável e ágil a execução de estudos que abrangem uma grande quantidade de dados, calhando em um abundante progresso para as ciências ambientais.

As informações usadas na pesquisa para a construção da Equação Universal de Perda de Solo foram: (i) informações de erosividade do NetErosividade MG[®] (MOREIRA *et al.*, 2008); (ii) mapa de solo (UFV *et al.*, 2010) e dados de erodibilidade dos solos (CHAVES, 1994); (iii) informações topográficas dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) oriundos dos sensores *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e informação de uso e cobertura do solo do sensor LANDSAT 5 TM.

A fim de se analisar a evolução do potencial de perda de solo na região a montante da PCH, inicialmente a presente pesquisa se propôs a determinar as áreas mais vulneráveis em dois períodos distintos, 1984 e 2010. Para isso aplicou-se a USLE nos dois anos. Os resultados não apresentavam mudanças significativas, motivado exclusivamente pelo uso do solo. Observou-se que o uso do solo dos anos analisados apresentou variação pequena para a escala da área. Senso assim, optou-se em seguir apenas com o ano de 2010.

O mapa da vulnerabilidade dos solos à erosão foi obtido no site do projeto ZEE-MG. Após pesquisas bibliográficas a forma do terreno foi estabelecida como a variável geomorfológica que melhor se enquadraria no objetivo de se cruzar a USLE com informações morfológicas. E o mapeamento da forma das vertentes foi obtido no site do projeto TOPODATA.

4.1 Área de Estudo

A PCH Salto do Paraopeba está localizada no rio Paraopeba, na porção da bacia denominada de Alto Paraopeba, e sua área montante possui 2.478,2 km² (Figura 5). Distante 3 km do núcleo urbano do município Jeceaba-MG, a usina iniciou sua

operação em 1956. Porém, em 2000, passou por reformas devido ao assoreamento que impediu a sua operação. Problemas ligados a assoreamento são corriqueiros na usina, tanto de acordo com Vale *et al.* (2013) atualmente a PCH Salto do Paraopeba encontra-se novamente inoperante.

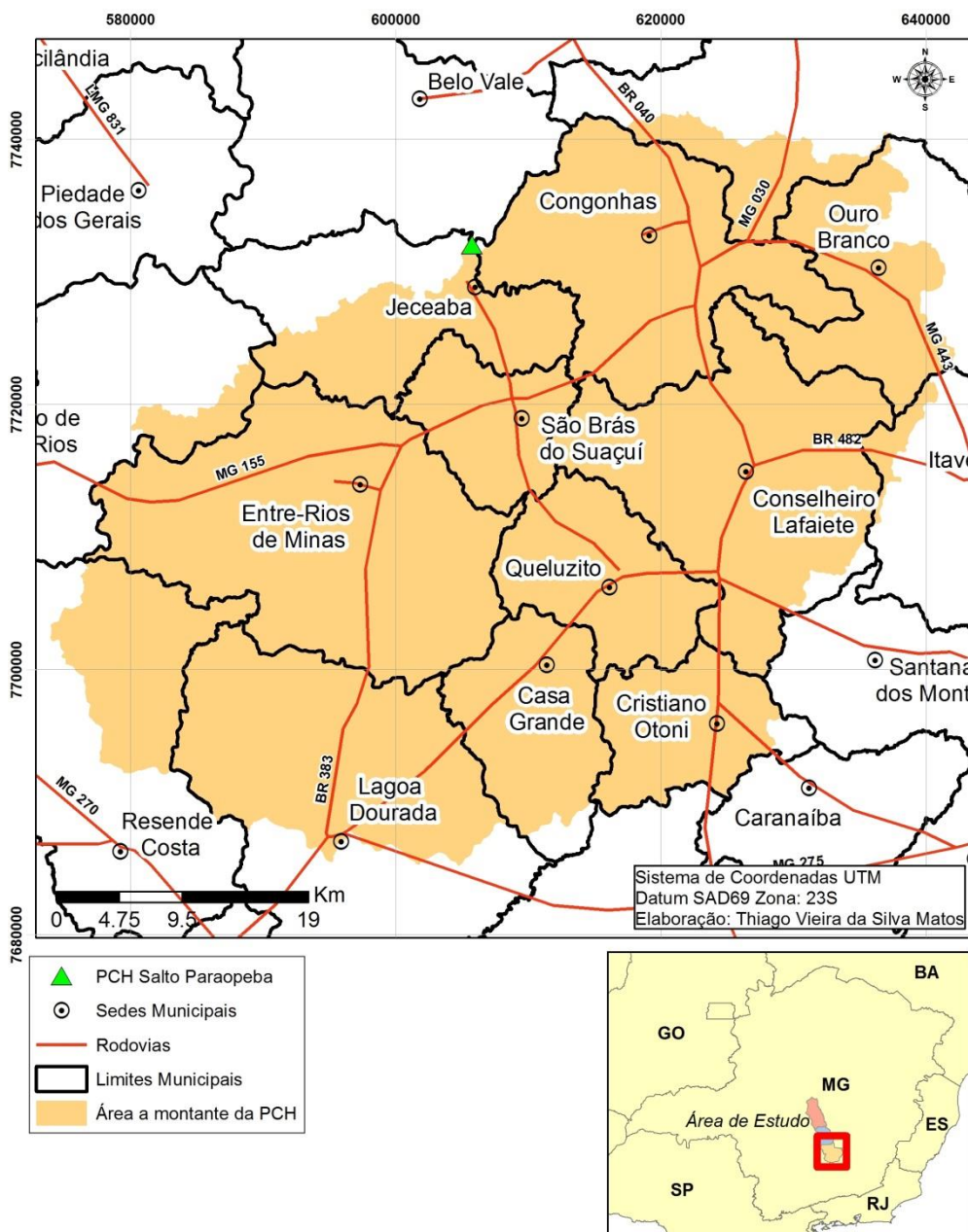


Figura 5: Localização da área de estudo

4.2 Erosividade – Fator (R)

O fator erosividade foi obtido por meio dos seguintes procedimentos:

- Obtenção e instalação do programa computacional NetErosividade MG[®] no site <<http://www.gprh.ufv.br/>>.
- Obtenção das coordenadas das estações pluviométricas existentes no contexto da área de estudo e, em seguida, os valores da erosividade da chuva pela latitude e longitude.
- Interpolação dos dados em SIG.

As coordenadas das estações de monitoramento pluviométrico da área de estudo (Figura 6) são do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (HIDROWEB/ANA) e foram baixadas em formato *shapefile*, compatível ao *software* ArcGIS 10.2.2[®].

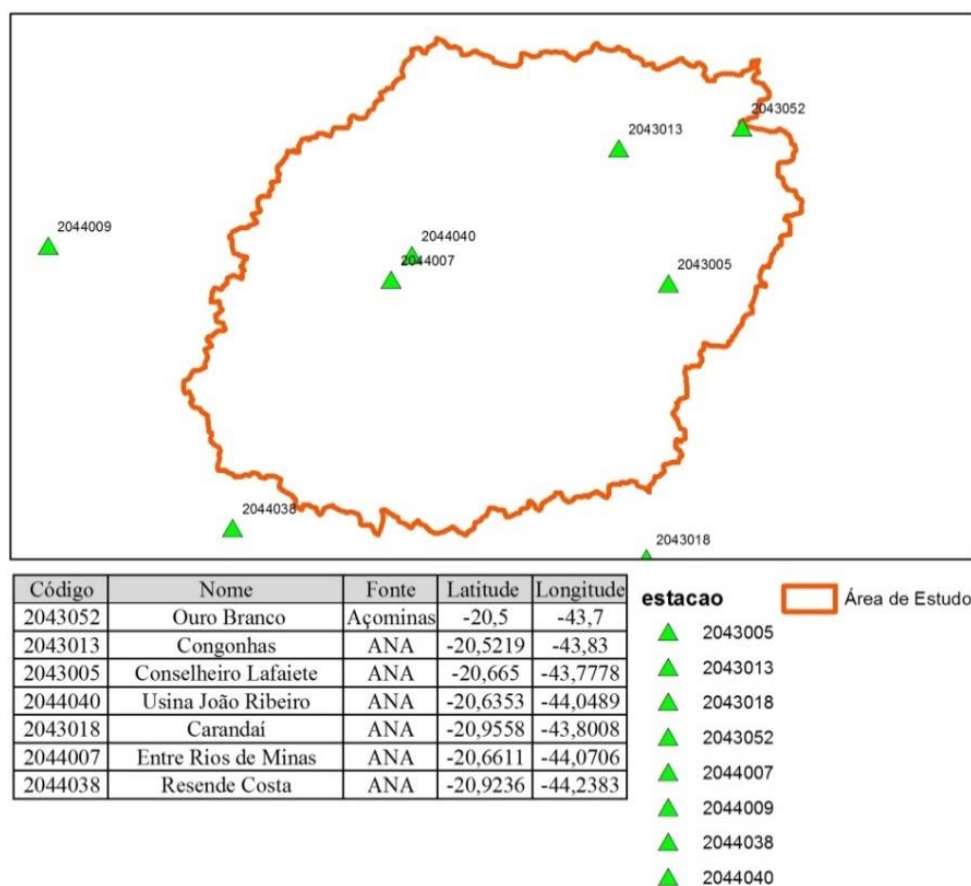


FIGURA 6: Coordenadas das estações de monitoramento pluviométrico da área de estudo

A erosividade da chuva foi obtida através do programa NetErosividade (MOREIRA, 2008). Este *software* foi desenvolvido para estimar o valor mensal e anual de EI₃₀ em qualquer localidade do estado de Minas Gerais, que podem ser obtidos de três maneiras: a partir do clique do *mouse* sobre o mapa do estado, do nome do município, ou do

fornecimento das coordenadas da localidade a ser buscada (Figura 7). De posse das latitudes e longitudes das estações, os índices de chuva foram obtidos e interpolados por *Krigagem*, dentro a extensão *Spatial Analyst* do software ArcGIS 10.2.2[®].

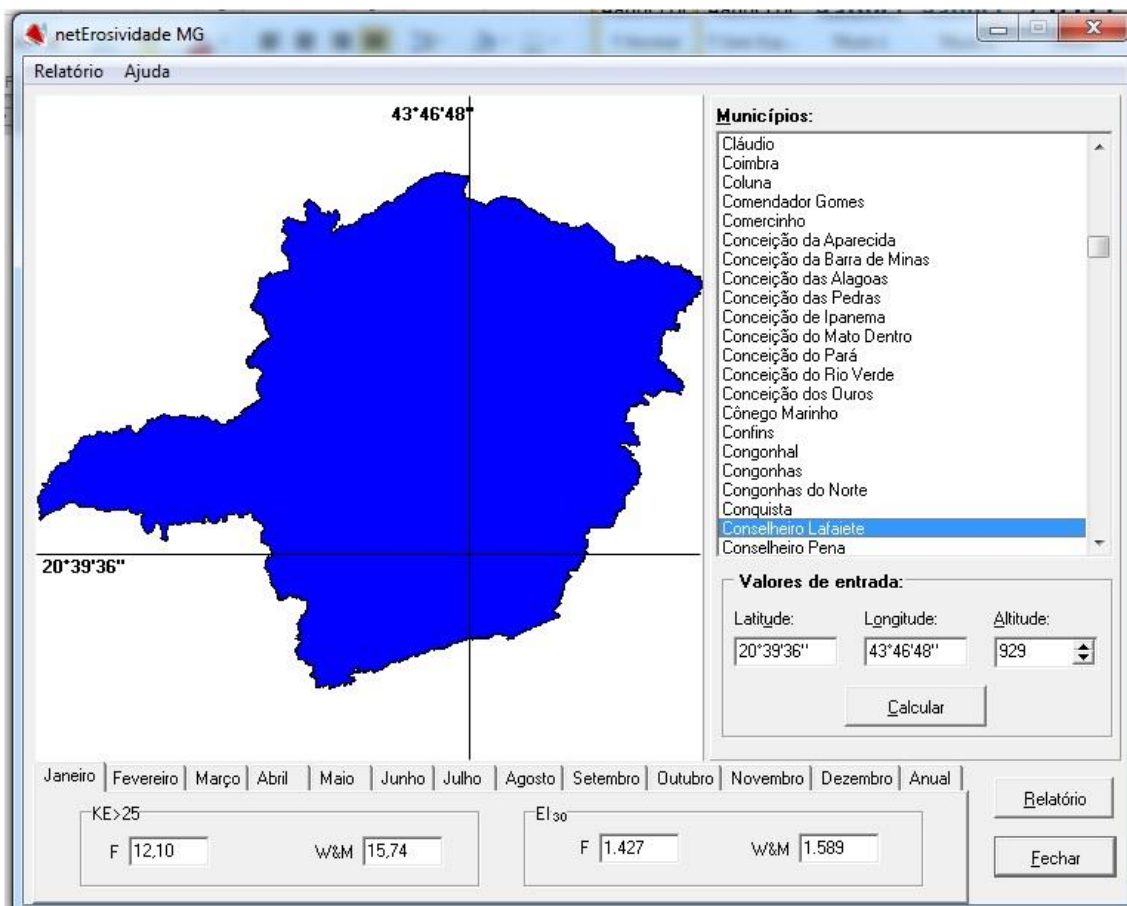


FIGURA 7: NetErosividade, para estimar os valores mensais e anual de EI_{30} em qualquer localidade do estado de Minas Gerais

TABELA 5: Erosividade por Estação Pluviométrica

ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	EI F
Resende Costa	-20.9236	-44.2383	6387
Carandaí	-20.9558	-43.8008	6409
Entre Rios de Minas	-20.6611	-44.0706	6528
Usina João Ribeiro	-20.6353	-44.0489	6541
Congonhas	-20.5219	-43.83	6599
Ouro Branco	-20.5	-43.7	6615
Conselheiro Lafaiete	-20.665	-43.7778	6541
Fazenda Campo Grande	-20.6253	-44.4333	6520
Melo Franco	-20.1978	-44.1208	6631
Itabirito	-20.3011	-43.7981	6664
Piranga	-20.6909	-43.2994	6543

Fonte: NetErosividade (MOREIRA, 2008)

4.3 Erodibilidade – Fator (K)

Os procedimentos para obter a erodibilidade foram os seguintes:

- Obtenção do mapa digital de solos do estado de Minas Gerais em escala 1:600.000.
- Levantamento dos dados de erodibilidade das classes de solos existentes na área de estudo.
- Classificação da base cartográfica com os índices de K de erodibilidade.

O mapa de solos da UFV (2010), em escala de 1:600.000 e formato *shapefile*, foi destacado da área de estudo por meio do *software* ArcGIS 10.2.2[®]. Os valores de erodibilidade foram selecionados com base no estudo de Chaves (1994) (Tabela 6), que desenvolveu um modelo de regressão tendo como base os dados de K obtidos por Denardin (1990), que, em seu trabalho, desenvolveu uma equação geral para todos os solos brasileiros. Entretanto, Chaves (1994) aplicou a mesma metodologia apenas para os solos que ocorrem na bacia do Rio São Francisco. Tal regionalização da metodologia possibilitou obter melhores coeficientes de determinação para a equação.

TABELA 6: Valores de Erodibilidade

SOLO	SIGLA	K (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Latossolo Vermelho Escuro	LVd...	0,013
Latossolo Vermelho Amarelo	LVAd...	0,02
Nossolo Litólico	RLd	0,035
Cambissolo Háplico	CXbd	0,06
Argissolo Vermelho	PVd	0,029

Fonte: CHAVES, 1994

O último passo foi transformar a base de solo do formato *shapefile* para o formato *raster*. Em seguida, o mapa de solos em formato *raster* foi reclassificado, substituindo-se as informações de classe de solos pela informação de erodibilidade (K) (Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹). Todos esses procedimentos foram executados dentro da extensão *Spatial Analyst* do *software* ArcGIS 10.2.2[®].

4.4 Fator topográfico – Fator (LS)

Os procedimentos para obter a o fator topográfico (LS) foram os seguintes:

- Obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 e 90 metros.
- Correção de depressões espúrias.
- Cálculo do fator topográfico com os modelos digitais de elevação de 30 e 90 metros:
 - metodologia de cálculo conjunto de LS sugerida por Bertoni (1959);
 - metodologia fragmentada
 - para o cálculo do L, a sugerida por Desmet e Govers (1996);
 - para o cálculo do S, a forma demonstrada por McCool *et al.* (1987).

De acordo com Wolf e Dewitt (2000), o MDE é a representação da superfície física terrestre em grades retangulares matriciais, em que cada pixel tem um valor numérico de elevação correspondente. Na pesquisa foram utilizados modelos com resoluções espaciais diferentes: ASTER GDEM de 30 metros e SRTM de 90 metros.

As imagens ASTER GDEM são o resultado do consórcio entre a NASA, Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI), *Earth Resources Data Analysis Center* (ERSDAC) e o *United States Geological Survey* (USGS), com o objetivo de estabelecer um MDE em escala global de acesso livre. Os modelos foram construídos a partir de pares estereoscópicos de imagens originárias da plataforma EOS AM-1 com o instrumento ASTER, sensor ANIR (ABRAMS *et al.*, 1999), e passaram a ser disponibilizados sem restrições a partir do mês de junho do ano de 2009. Para captar as informações altimétricas da superfície, o sensor opera no modo estereoscópico com as bandas 3N (nadir) e 3B (*backward*) correspondente à faixa do infravermelho próximo (0,78 – 0,86 μm) (Yanaguchi *et al.*, 1999). As cenas GDEM possuem resolução espacial de 30 metros e cobrem 99% do plano, sendo, então, o mais completo mapa de superfície de que se tem registro (RODRIGUES *et al.*, 2010).

O modelo obtido do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi lançado em fevereiro de 2000, a bordo do ônibus espacial Endeavour. Durante 11 dias obteve dados

de altimetria estereoscópica de 80% da superfície terrestre, gerando imagens com resolução espacial (nos dados fontes) de 30 para os Estados Unidos e 90 metros para o restante do mundo, projetados para uma acurácia vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 metros, respectivamente, com 90% de confiança (MEDEIROS *et al.*, 2009).

Antes de iniciar o cálculo do fator topográfico nos MDEs, foi necessário corrigir as falsas depressões ou depressões espúrias. De acordo com Tarboton (1991), essas depressões acontecem devido à baixa resolução do arquivo ou erros do imageamento.

Para geração do fator LS de forma conjunta, foi aplicada a equação proposta por Bertoni (1959) para a cidade de Campinas, mas que se adaptou bem às condições brasileiras, partindo da relação experimental de perda de solo com diversos graus de declividade. A equação abaixo foi aplicada nos MDEs de 30 e 90 metros, no módulo *raster calculator*, existente no *software* ArcGIS 10.2.2®.

$$LS = 0,00984 \times C^{0,63} \times S^{1,18}$$

Onde:

L = fator topográfico

C = comprimento da rampa em metros

S = declividade (%)

O cálculo do fator topográfico de forma fragmentada se inicia com o cálculo do comprimento de rampa (L). Desmet e Goovers (1996) sugeriram um algoritmo para o cálculo automático do fator topográfico, tendo como fundamento o conceito de área de contribuição. Essa metodologia foi desenvolvida para ser aplicada em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) e é representada através desta equação:

$$L_{ij} = \frac{[(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - (A_{ij-in})^{m+1}]}{[D^{m+2} \cdot x_{ij}^m (22,13)^m]}$$

Onde:

L_{ij} = é o fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i,j);

$A_{i,j-in}$ = área de contribuição da célula em coordenadas (i,j) (m^2);

D = tamanho da célula em metros;

x = coeficiente função do aspecto para grade de célula em coordenada (i,j)

m = coeficiente função da declividade para a grade de célula com coordenada (i,j)

Quinn *et al.* (1991) desenvolveram um algoritmo que calcula de forma automática a área de contribuição. Segundo Desmet e Goovers (1996) esse algoritmo considera o “fluxo múltiplo” (FIGURA 8.2) e traz considerável benefício em relação ao “fluxo único” (FIGURA 8.1), pois leva em consideração a convergência e divergência do escoamento, e não apenas um único plano. A decorrência é uma representação mais realista da propagação da água em superfícies topograficamente complexas.

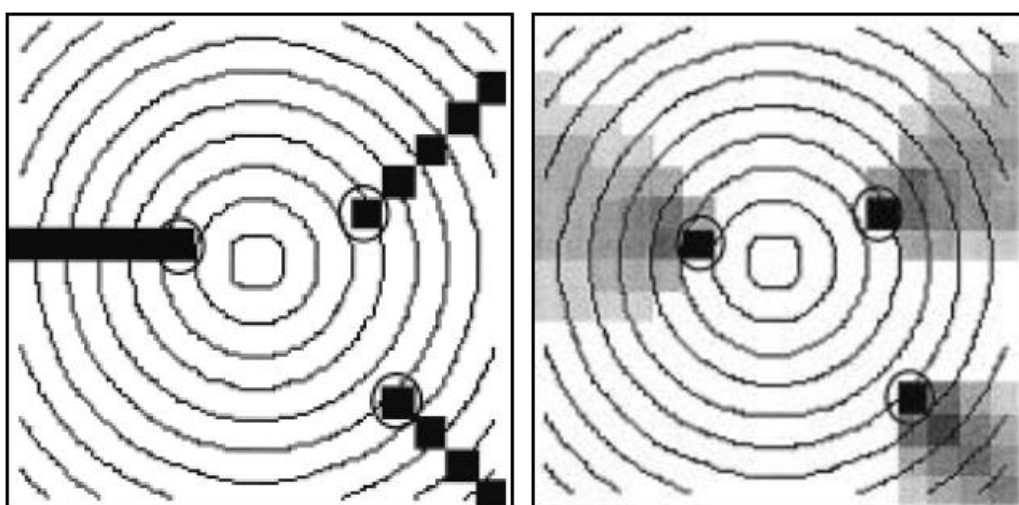


FIGURA 8.1: Fluxo único

Fonte: Tarboton (1997)

FIGURA 8.2: Fluxo múltiplo

Fonte: Tarboton (1997)

Para o cálculo do fator de declividade, foi utilizada a relação desenvolvida por McCool *et al* (1987), que é ultimamente adotada como parte da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE). As equações são escritas da seguinte forma:

$$S = 10,8 \times \sin \theta + 0,03, \text{ quando declividade} < 9\%$$

$$S = 16,8 \times \sin \theta - 0,5, \text{ quando declividade} \geq 9\%$$

Onde θ é o ângulo de declividade.

4.5 Fator uso e manejo (CP)

Os procedimentos para a obtenção do fator CP foram os seguintes:

- Aquisição da cena do satélite TM LANDSAT 5 no site do INPE <www.dgi.inpe.br/CDSR>.

- Pré-processamento.
- Georreferenciamento e Segmentação da imagem.
- Classificação do uso e cobertura do solo.
- Pós-classificação.
- Atribuição dos valores de CP às classes de uso do solo.

O mapa de uso e cobertura da área de estudo foi gerado pela classificação da imagem TM LANDSAT 5 da série *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT).

O satélite LANDSAT 5 foi lançado em 1º de março de 1984 e funciona em órbita equatorial a 705 km de altitude. O sensor TM (*Thematic Mapper*) a bordo do satélite LANDSAT 5 faz o imageamento da superfície terrestre produzindo imagens com 185 km de largura no terreno, resolução espacial de 30 metros e 7 bandas espectrais. O tempo de revisita do satélite para imagear uma mesma porção do terreno é de 16 dias.

A cena adquirida para a pesquisa tem a data de primeiro de agosto de 2010 e todas as suas especificações técnicas podem ser observadas na figura 9. Para a sua classificação, foram utilizadas 3 bandas do satélite. Suas especificações de resolução e do comprimento de onda são apresentadas na tabela 7. As bandas utilizadas foram a bandas 3, 4 e 5 e a composição delas foi RBG-543.

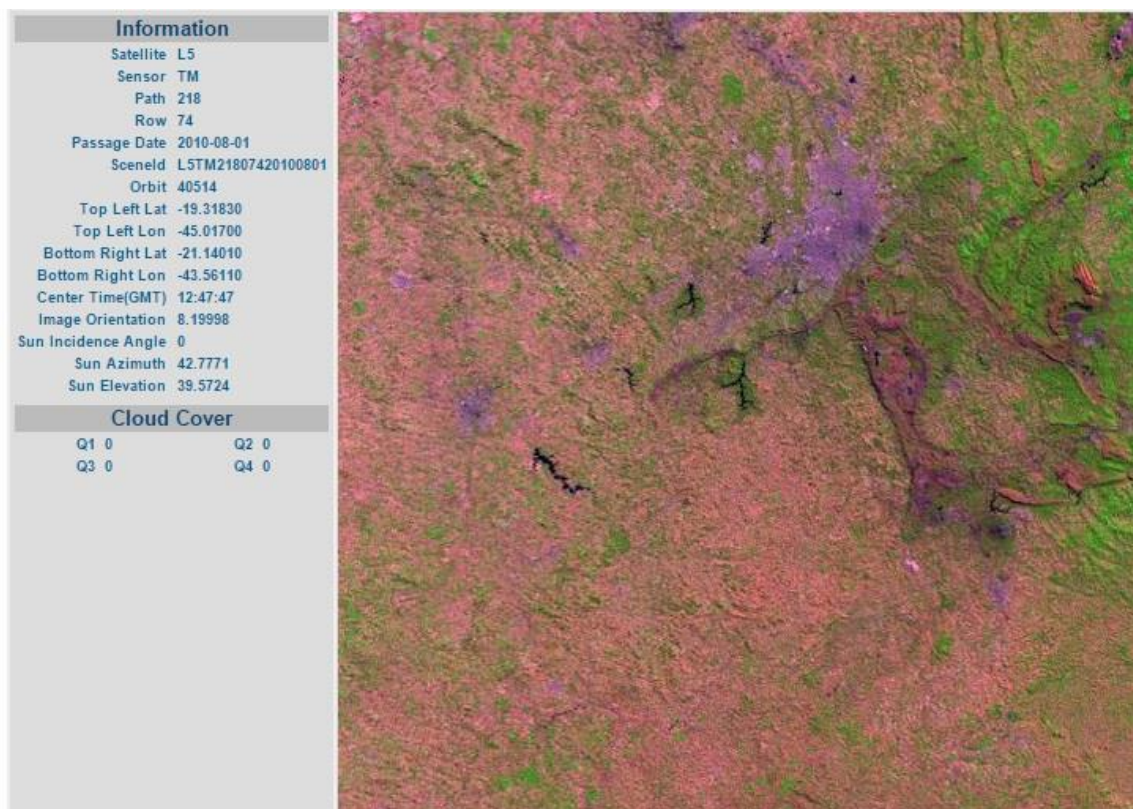


FIGURA 9: Cena LANDSAT 5 utilizada no trabalho
Fonte: INPE

TABELA 7: Comprimento de onda e resolução espacial das bandas LANDSAT 5

SENSOR	BANDA ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPECTRAL	RESOLUÇÃO ESPACIAL	RESOLUÇÃO TEMPORAL
TM	3 - vermelho	0,63 - 0,69 μm	30 m	16 dias
TM	4 - Infravermelho próximo	0,76 - 0,90 μm	30 m	16 dias
TM	5 - Infravermelho médio	1,55 - 1,75 μm	30 m	16 dias

Fonte: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

O processamento digital de imagem de satélite, também conhecido pela sigla PDI, apresenta procedimentos de correção e análise de informações nas imagens de sensoriamento remoto. Assim, a partir da aplicação de técnicas de PDI, é possível obter das imagens elementos necessários para o estudo de cobertura da terra, possibilitando a construção de mapas com classes de cobertura e uso da terra em diferentes épocas.

Dos procedimentos básicos para a melhor obtenção das informações no PDI, estão a normalização de imagens de satélite, correção geométrica, segmentação e classificação de imagens de satélite.

A normalização consiste em um procedimento que busca corrigir as interferências atmosféricas ocasionadas pelas diferenças de condições atmosféricas na coleta das

imagens. Chavez (1988) propôs um método de correção atmosférica que se baseia na subtração do objeto escuro, sendo a correção do espalhamento atmosférico feita a partir da interferência atmosférica estimada pelos números digitais (ND) da imagem. O objeto escuro na cena podem ser lagoas profundas ou áreas sombreadas, onde a energia eletromagnética (REM) é totalmente absorvida ou interceptada.

A correção geométrica, popularmente conhecida como georreferenciamento, visa eliminar as distorções na imagem causadas por diversos motivos, por exemplo: velocidade do sensor, variação de altitude, movimento de rotação da Terra durante a aquisição da imagem, curvatura da Terra, entre outros. O estabelecimento dessa correção é possível por meio da obtenção de pontos de controle ou por imagens e mapas de referência, oriundos de fontes oficiais confiáveis.

Na segmentação, a imagem é fragmentada em regiões ou objetos que correspondam às áreas de interesse (GONZALES e WOODS, 2002) . Tais regiões são constituídas por um conjunto de *pixels* contíguos que apresentam uniformidade em relação a um tipo de atributo extraído da imagem, como área, forma, parâmetros estatísticos espectrais e textura. Normalmente, os métodos de segmentação são baseados em dois enfoques: descontinuidade e similaridade. Métodos baseados em descontinuidade identificam na imagem alterações súbitas de intensidades, como os limiares. Já os métodos de similaridade trabalham com a fragmentação da imagem em regiões similares de acordo com alguns critérios pré-definidos, como similaridade e área.

A segmentação de imagem é uma etapa preliminar para a classificação de imagem baseada em regiões. Nesse método, o elemento de classificação da imagem não é o *pixel*, mas sim o agrupamento de *pixels* resultante da segmentação (LUIZ, 2014).

A classificação é o processo que envolve o processamento computacional da imagem de satélite, buscando aglomerar blocos de *pixels* que possuam dados com informações semelhantes. O algoritmo de classificação selecionado para o processamento das imagens nesta pesquisa foi o da distâncias de *Battacharya*, por envolver análise a partir de regiões e pelo fato de o treinamento ser supervisionado. Esse algoritmo é empregado para calcular a separabilidade estatística de um par de classes espectrais (DPI-INPE, 2011), isto é, o cálculo é feito a partir da distância média entre as distribuições de probabilidade das classes espectrais. Assim, o algoritmo trabalha com um par de classes

de interesses por vez. Baseando-se no treinamento supervisionado, as regiões são classificadas de acordo com a menor distância de *Battacharya* encontrada em relação à determinada classe e associada à classe mais próxima, ou menor distância.

Desenvolvido pelo INPE o classificador utilizado nesta pesquisa foi o *software* SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996). Ele foi utilizado para a segmentação e classificação de imagens e dispõe de diferentes classificadores, opções de treinamento e elementos de classificação, de acordo a Tabela 8.

TABELA 8: Classificadores disponíveis no SPRING de acordo com o elemento de classificação e tipo de treinamento

Classificador	Elemento	Tipo de Treinamento
Distância de Battacharya	Região	Supervisionado
Isoseg	Região	Não-supervisionado
ClaTex	Região	Supervisionado
Histograma	Região	Não-supervisionado
Classificação por SNNS (Rede Neural)	Região	Não-supervisionado
Máxima Verossimilhança (MAXVER)	Pixel a pixel	Supervisionado
Contextual (MAXVER-ICM)	Pixel a pixel	Supervisionado
Distância Euclidiana	Pixel a pixel	Supervisionado
Kmédias	Pixel a pixel	Não-supervisionado

Fonte: Luiz (2014)

A normalização e a correção geométrica deram-se no *software* ArcGIS 10.2.2[®] e o procedimento de segmentação e classificação no *software* SPRING. O método de segmentação escolhido é o de crescimento de regiões com padrões de similaridade de 15 e área de 10 *pixels*. Os valores de similaridade e áreas foram estabelecidos a partir de alguns testes de segmentação e a escolha dos limites baseou-se no nível de detalhamento necessário para a escala da região, 1:420.000.

Para a classificação do uso e cobertura do solo, estabeleceu-se a chave de classificação, representada na Tabela 9 baseado nos trabalhos de Anderson *et al.* (1976) e IBGE (2006)

TABELA 9: Chave de classificação de Uso e Cobertura do Solo

Nível I	Nível II
1. Áreas construídas	1.1 Urbana de Alta intensidade
	1.2 Urbana de Média intensidade
	1.3 Industrial
2. Áreas Agrícolas	2.1 Pastagem
	2.2 Cultura Permanente
	2.3 Cultura Temporária
	2.4 Silvicultura
3. Vegetação Natural	3.1 Vegetação Arbórea
	3.2 Vegetação Campestre
4. Desnudo	4.1 Mineração
5. Água	5.1 Corpos de água

Fonte: IBGE (2006)

Como já citado anteriormente, a classificação foi construída no *software* SPRING, adotando o método distâncias de *Battacharya* e obtendo um desempenho geral de 100% na matriz de confusão da classificação. De acordo com Congalton e Green (1999), matriz de confusão tem como função apurar as diferenças entre o resultado da classificação e a realidade, de modo que na diagonal são apontados os *pixels* classificados corretamente e, na soma dos valores marginais de linhas e colunas, são apresentados os erros de cada classe temática.

Posterior à classificação das imagens, os resultados do mapeamento das classes de cobertura do solo carecem de conferência. Esse momento é definido por pós-classificação e requer muita dedicação e atenção, pois incide em uma etapa demorada e exaustiva. Vale lembrar que esse procedimento é indispensável, pois os erros são presentes em qualquer tipo de classificação (CAMPBELL, 1987 *apud* LUIZ, 2014).

Finalmente, foram conferidos os valores do fator CP, Tabela 10, para cada classe de uso e cobertura do solo existentes na área de estudo, de acordo com os valores aferidos por Stein *et al.* (1987). A atribuição dos valores do CP ao uso do solo foi executado dentro a extensão *Spatial Analyst* do *software* ArcGIS 10.2.2[®].

TABELA 10: Uso do solo x fator CP

Uso	CP Stein <i>et al.</i> (1987)
Corpos d'água	0
Mineração	0
Urbano	0
Vegetação Arbórea	0,00004
Silvicultura	0,0001
Vegetação Campestre	0,01
Pastagem	0,01
Cultura Temporária	0,2
Solo Exposto	0,2

Fonte: Stein *et al.* (1987)

4.6 Construção do mapa de potencial à erosão através do USLE

A construção de todas as informações tratadas anteriormente foi estabelecida no sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) e *datum* SAD69. Imediatamente todos os fatores em formato *raster*, de resolução espacial de 30 metros, foram “recortadas” para a área de estudo. Por fim, foi utilizado a ferramenta *Raster Calculator* do *software* ArcGIS 10.2.2[®] para a multiplicação de todos os fatores da USLE, seguindo a Equação (1) a seguir, onde **R** é o fator de erosividade da chuva, **K** é o fator de erodibilidade do solo, **LS** é o fator topográfico e **CP** o fator de uso, manejo e práticas conservacionais.

$$USLE = R \times K \times LS \times CP \quad (1)$$

4.6.1 Discretização em sub-bacias

Atualmente, a bacia hidrográfica como unidade espacial de gestão e análise ambiental é amplamente utilizada, pois esse recorte possibilita uma análise sistemática de todos os fenômenos naturais que ocorrem na superfície terrestre. Segundo Corato e Botelho (2001), para a gestão é necessário estar atento à escala de trabalho envolvida, pois a atividade estabelece uma etapa de planejamento do projeto e outra de monitoramento dos resultados e efeitos. Dessa forma, os projetos de planejamento e gestão passaram a se desenvolver em bacias hidrográficas de menor tamanho, surgindo, assim, o conceito sub-bacia. A criação do Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas (PNMH), em 1987, expandiu e popularizou o uso do termo.

Na presente pesquisa, a discretização da área de estudo (Figura 10) possibilitou ter uma informação mais estratégica do potencial de perda de sedimento, permitindo, desse modo, determinar a região mais crítica. O critério de discretização teve como premissa definir as principais regiões hidrográficas a montante da PCH. Desta foram estabelecidas a área do rio Camapuã e a do rio Maranhão e do ribeirão Pequiri. As duas últimas áreas foram consideradas juntas, para então, possuírem escala semelhante a do rio Camapuã. Assim, as áreas remanescentes foram aquelas que contribuem diretamente a PCH.

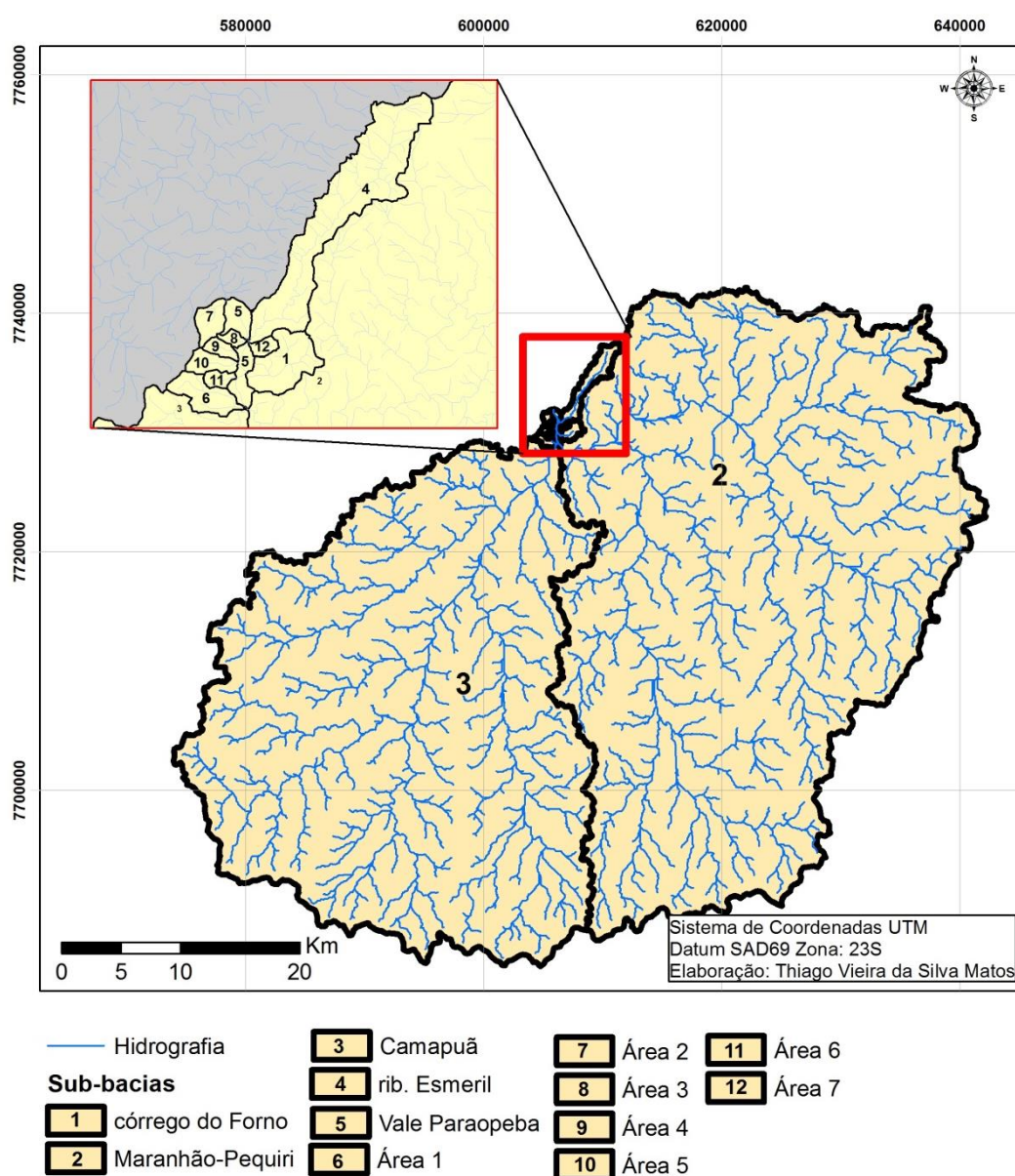


FIGURA 10: Discretização das unidades de análise.

4.7 Mapa de vulnerabilidade dos solos a erosão - ZEE

Conforme levantado anteriormente, o Mapa de vulnerabilidade dos solos à erosão foi obtido no site <<http://www.zee.mg.gov.br/>> do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do estado de Minas Gerais (ZEE-MG) e foi discretizado de acordo com a área de estudo e quantificada no *software* ArcGIS 10.2.2[®].

4.8 Mapa de forma de terreno

O produto referente ao mapa de forma de relevo foi obtido no site <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>> do projeto Topodata. Lançado em 2008, o projeto oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas variáveis geomorfométricas locais básicas para todo território nacional.

Por uma questão de escala, estabeleceu-se que a discussão em torno das possibilidades do uso dos resultados da USLE com a Forma de Terreno Divergente seria feito na sub-bacia do rio Camapuã. A escala local de sub-bacia justifica-se ao considerar o caráter exploratório dessa discussão. Portanto, o produto referente à forma do terreno e o resultado da USLE foram discretizados no limite da bacia Camapuã, e em seguida sobrepostos e quantificados no *software* ArcGIS 10.2.2[®]. Essa quantificação considerou apenas o potencial de perdas de solo acima do limite tolerável de solos no Brasil, como já abordado no Capítulo 3.

5. RESULTADOS

5.1 Uso e Cobertura do Solo

Como abordado na Metodologia, à premissa da pesquisa foi determinar a USLE em dois períodos distintos, 1984 e 2010. Os fatores naturais contemplados na equação são os mesmo em qualquer ocasião, então para determinar o potencial em períodos diferentes foi possível através da obtenção do uso e cobertura do solo dos anos referidos. Entretanto, ao final do processo observou que a evolução do potencial foi pouco significativa.

Analisando os resultados da Tabela 11, foi possível definir que essa evolução pouco significativa foi ocasionada pela ocupação da região estudo, já consolidada em 1984. É claro, que esta afirmação se aplica ao recorte regional do estudo, pois em sub-bacias menores, foram observadas alterações significativas, como por exemplo, o a sub do ribeirão Esmeril. Desta forma todo o procedimento adiante foi todo construído sobre o uso do solo de 2010.

Tabela 11: Variação do Uso do solo a montante da PCH Salto do Paraopeba

Classe	Área 1984 (%)	Área 2010 (%)
Água	0.36	0.42
Cultura Temporaria e Solo Exposto	2.80	4.60
Mineração/ Urbano	1.45	1.87
Pastagem	58.59	55.86
Silvicultura	0.71	4.31
Urbano	1.76	2.78
Veg. Arborena	18.65	24.44
Veg. Campestre	15.68	5.74
Total	100	100

5.2 Uso e Cobertura do Solo da montante da PCH Salto do Paraopeba

Concluído o mapeamento, foram identificadas 9 classes de Uso e Cobertura do Solo: corpos d'água, cultura temporária, mineração, pastagem, silvicultura, solo exposto, urbano, vegetação arbórea, vegetação campestre, como pode ser visto na Figura 11. O

mapeamento foi elaborado a partir de classificação supervisionada e interpretação visual de imagem de satélite de média resolução LANDSAT 5. A interpretação visual possibilitou identificar e retificar áreas que não foram bem qualificadas através da classificação supervisionada.

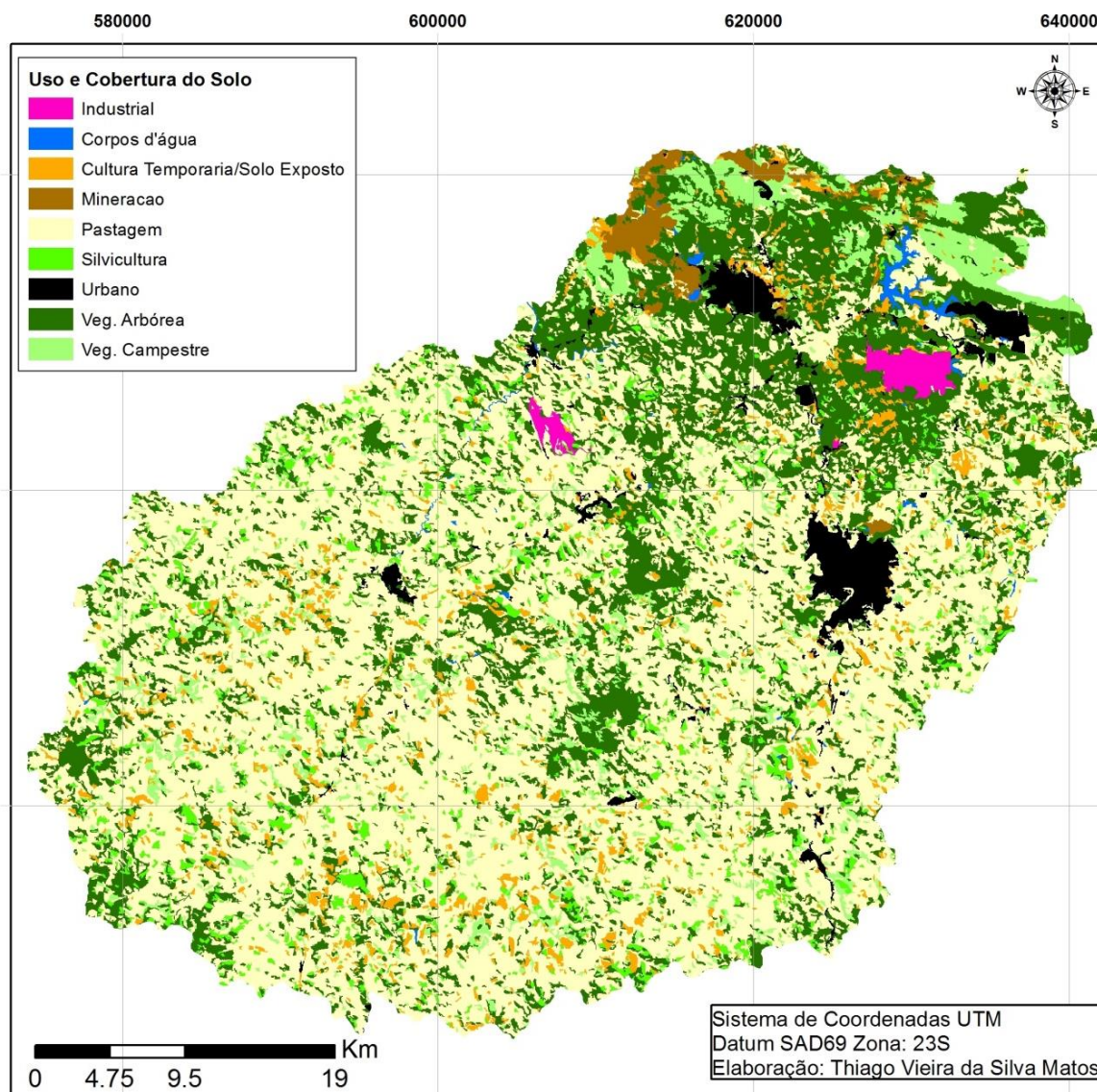


Figura 11: Mapa de Uso e Cobertura do Solo

De acordo com a Matriz de confusão, Tabela 12, o desempenho das amostras de todas as classes foi de 100%. Ou seja, nenhuma amostra foi classificada pelo Software como pertencente à outra classe a qual foi definida. Contudo, mesmo o classificador demonstrando a não existência de erros, o software comete pequenos equívocos, trazendo a necessidade da realização do pós-processamento. Etapa fundamental para a maior acurácia da identificação.

Tabela 12: Matriz de confusão

Dados Classificados	Água	Mineração	Área Urbana	Silvicultura	Pastagem	Cultura Temporária e Solo Exposto	Vegetação Campestre	Vegetação Arborea	Sombra	total
Água	14028	0	0	0	0	0	0	0	0	14028
Mineração	0	27252	0	0	0	0	0	0	0	27252
Área Urbana	0	0	29289	0	0	0	0	0	0	29289
Silvicultura	0	0	0	4687	0	0	0	0	0	4687
Pastagem	0	0	0	0	63555	0	0	0	0	63555
Cultura Temporária e Solo Exposto	0	0	0	0	0	14029	0	0	0	14029
Vegetação Campestre	0	0	0	0	0	0	28026	0	0	28026
Vegetação Arborea	0	0	0	0	0	0	0	177995	0	177995
Sombra	0	0	0	0	0	0	0	0	4449	4449
Soma	14028	27252	29289	4687	63555	14029	28026	177995	4449	363310

Como pode ser observado na Tabela 13 e Figura 12, as áreas urbanas representam 2,78% do uso da área. A maior concentração deste uso foi observada nos municípios mais adensados da área: Conselheiro Lafaiete, Congonhas e Ouro Branco. Todas estas manchas urbanas foram localizadas na sub-bacia Maranhão-Pequiri. Na Figura 13, observa-se a área urbana do município de Ouro Branco representada na imagem LANDSAT 5.

Tabela 13: Distribuição das classes de Uso do Solo

Nível I	Nível II	Área (Km ²)	Área (%)
1. Áreas Construídas	1.1 Urbano	68,71	2,78
	1.2 Industrial	16,48	0,67
2. Áreas Agrícolas	2.1 Pastagem	1381,24	55,86
	2.3 Cultura Temporária	113,65	4,60
	2.4 Silvicultura	106,46	4,31
3. Vegetação Natural	3.1 Vegetação Arbórea	604,37	24,44
	3.4 Vegetação Campestre	141,88	5,74
4. Desnudo	4.1 Mineração	29,67	1,20
5. Água	5.1 Corpos d'água	10,32	0,42
Total		2472,78	100

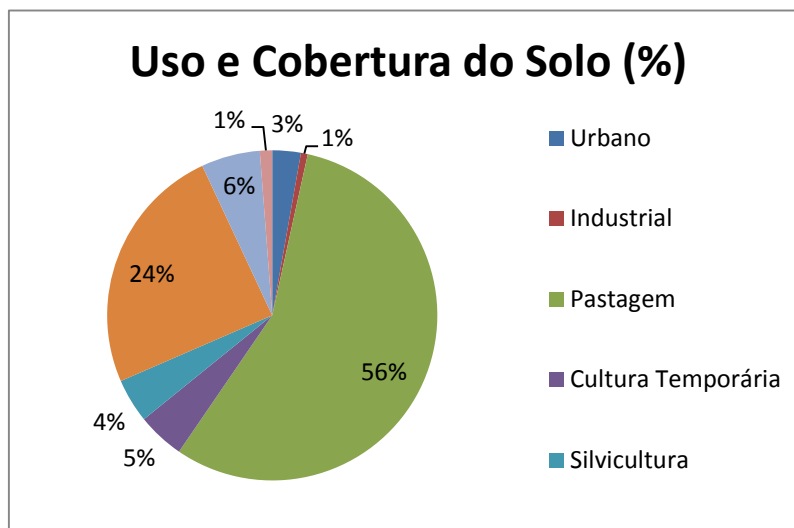


Figura 12: Gráfico de distribuição do Uso do Solo.

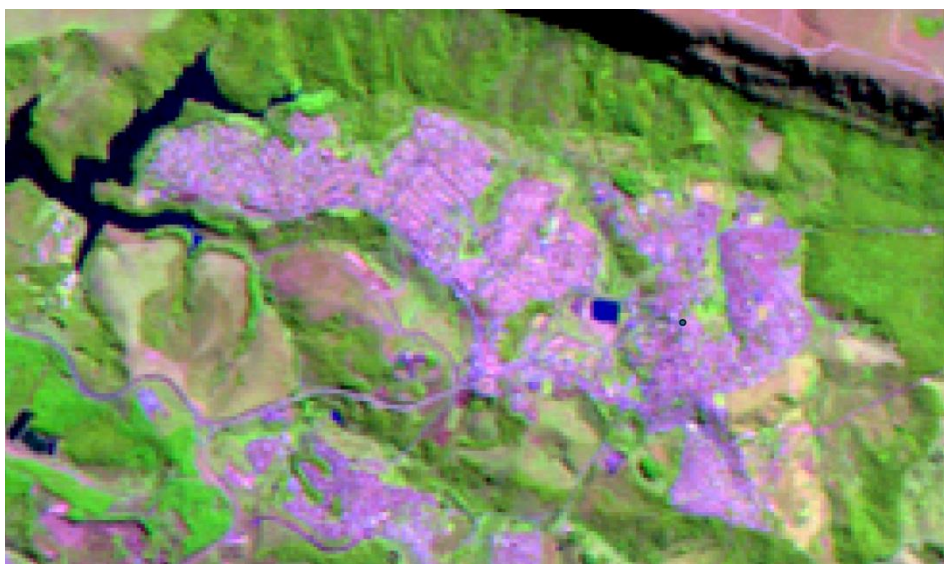


Figura 13: Imagens LANDSAT 5 de Áreas urbanas, Ouro Branco

As áreas industriais representam 0,67% da área total, destacando-se a AÇOMINAS, localizada na sub-bacia Maranhão-Pequiri, e o complexo siderúrgico Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB), localizada entre as sub-bacias Maranhão-Pequiri e Camapuã, Figura 14.

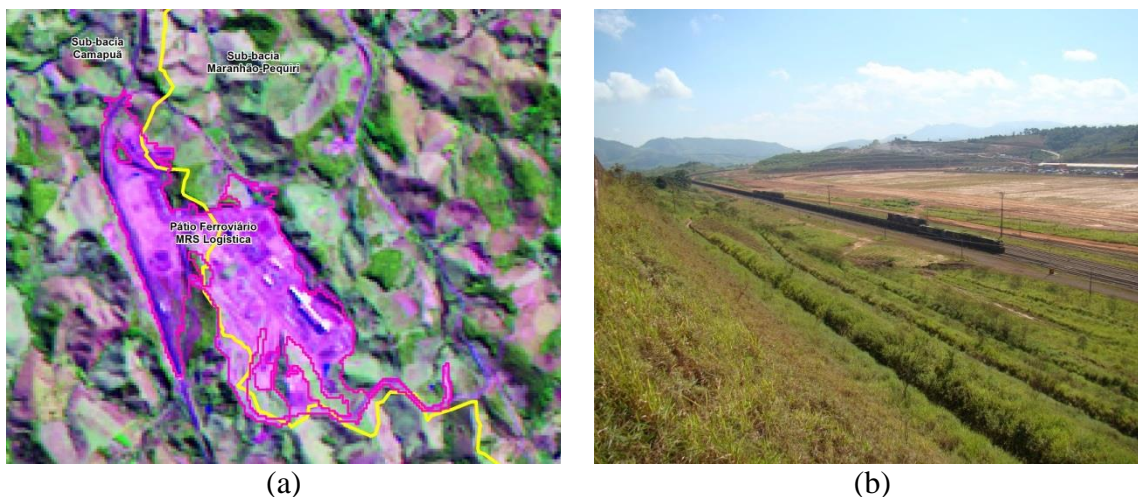


Figura 14: Imagens LANDSAT 5 representando área industrial (a) e foto da área industrial VSB.

Nas pequenas e médias propriedades rurais é habitual existir vários tipos de usos do terreno; lavoura, pastagem, eucalipto e etc. Por incidirem lado a lado, há confusão na classificação de imagens de média resolução, em função do problema de *pixels* misturados (LANZA, 2011).

Cobrindo 55,68% do território a pastagem é a classe dominante na área a montante da PCH Salto do Paraopeba. Lanza (2011) observou que devido às várias espécies de capim existentes, e também pela forma de ocupação do terreno, encontram-se diversos tipos e condições de pastagem. Para transpor esta barreira optou-se por coletar o maior número possível de amostras da pastagem, assim, o classificador teria menor possibilidade de erro. Além disso, como pode-se observar na Figura 15, a composição RGB escolhida para classificação reforça as diferenças entre vegetação de alto porte com vegetações mais rasteiras, como a pastagem.

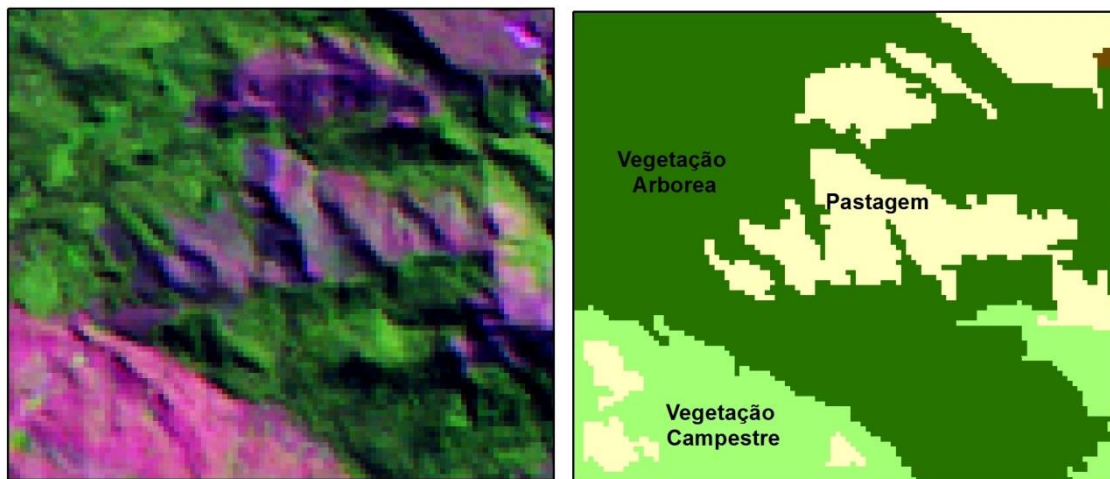


Figura 15: Imagens LANDSAT 5 representando diferença de vegetação rasteira e vegetação de alto porte.

Por serem condicionadas pela a temporalidade, as culturas temporárias apresentam um comportamento dinâmico. Os cultivos temporários comumente são representados por culturas de hortaliças, milho, cana e mandioca. Em glebas que possuem irrigação, o plantio pode ser realizado o ano inteiro, já onde não há, a aração do solo e o plantio são realizados ao final do período seco.

Para evitar problemas relacionados a nuvens ou qualquer outra alteração atmosférica ocasionada pela chuva, a imagem utilizada na classificação é do mês de agosto, no período seco. Sendo assim, muitas áreas de cultivo temporário apresentam neste período solo exposto (Figura 16). O que ocasionou das classes de cultura temporária e solo exposto serem consideradas juntas e representarem 4,6% da área total.

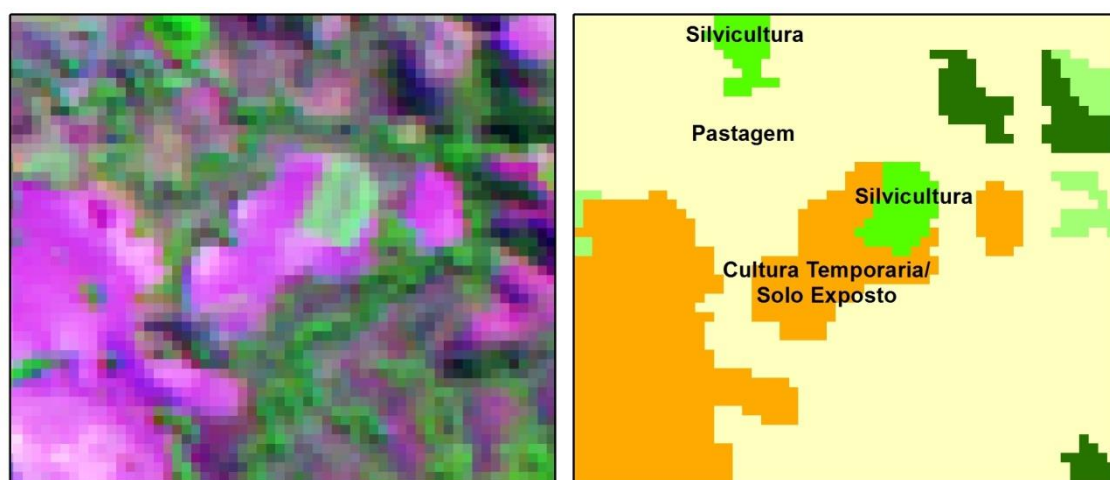


Figura 16: Imagens LANDSAT 5 representando a resposta do classe Cultura Temporal e Solo Exposto.

Caracterizada especialmente pelo cultivo de eucalipto, a silvicultura representou 4,31% do total da área. Devido sua alta reflectância na banda do infravermelho a cultura de eucalipto apresenta uma resposta espectral característica, conforme Figura 17. Assim, a classe proporciona um bom comportamento na classificação supervisionada. O manejo do eucalipto produz indivíduos com altura homogênea e com espaços entre si regulares. Fazendo com que exista pouca sombra e, logo, uma resposta espectral mais homogênea da superfície das folhas. A silvicultura ocorre em toda a área de estudo.

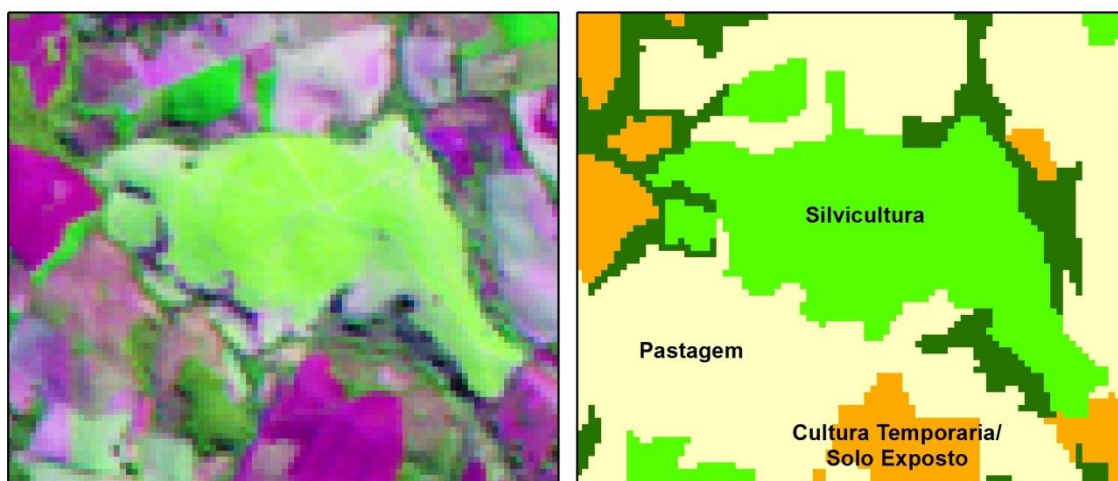


Figura 17: Imagens LANDSAT 5 representando a alta reflectância da classe Silvicultura.

Possuindo 24,44% da área, a vegetação arbórea é floristicamente heterogênea. Seus indivíduos apresentam alturas variadas, provocando sombreamento na copa dos mais baixos (LANZA, 2011). Para superar a heterogeneidade da classe foram identificadas áreas com vegetação arbórea bem consolidada e marcadas pela diferença entre as classes adjacentes, como pode-se observar na Figura 18.



Figura 18: Vegetação Arbórea no Córrego Almas Norte, Serra da Moeda.

Com 5,74% da área, a vegetação campestre é uma fitofisionomia muito comum nos complexos de serras do Quadrilátero Ferrífero, Figura 19. Assim, esta região foi a principal para se definir as amostras mais relevantes desta classe.



Figura 19: Vegetação Campestre no (a) Ribeirão do Esmeril, Serra do Esmeril (b) Serra da Moeda.

As áreas de mineração ocupam 1,2% da área, desta quase toda sua maioria no município de Congonhas, na sub-bacia Maranhão-Pequiri. Na composição das bandas da imagem de satélite utilizada no estudo, essa classe pode apresentar confusão com o uso urbano. Mas como os dois usos são bem pontuais e apresentam boas amostras, sua identificação e classificação não trouxe grande restrição (Figura 20).

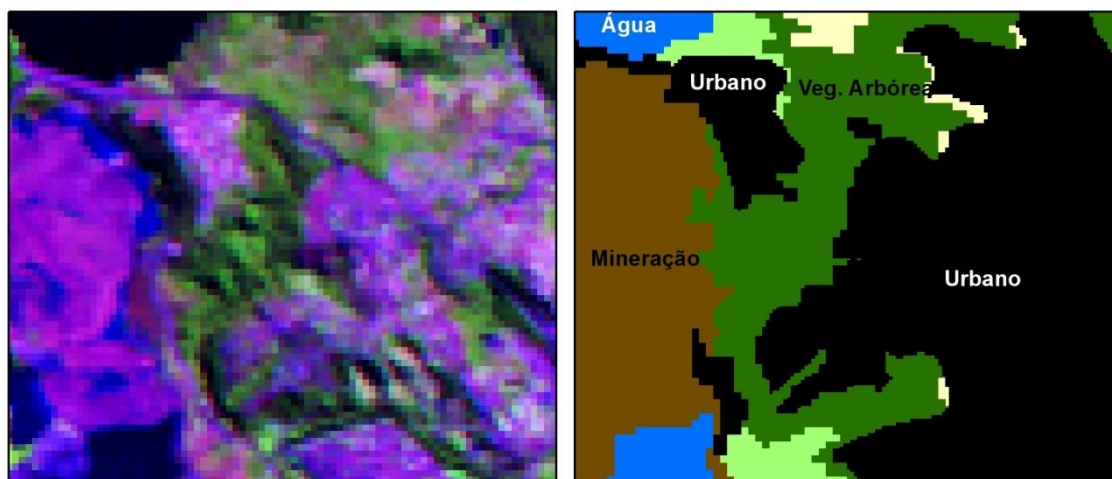


Figura 20: Imagem LANDSAT 5 apresentando a semelhança entre os usos mineração e urbano.

Por fim, a classe corpos d'água apresentou todos os corpos aquáticos existentes na região. Possuindo 0,42% da área, nesta classe são englobados elementos como: represas artificiais, barramento de mineração, lagos, lagoas e rios que possuem largura acima da escala da imagem, 30 metros (Figura 21).

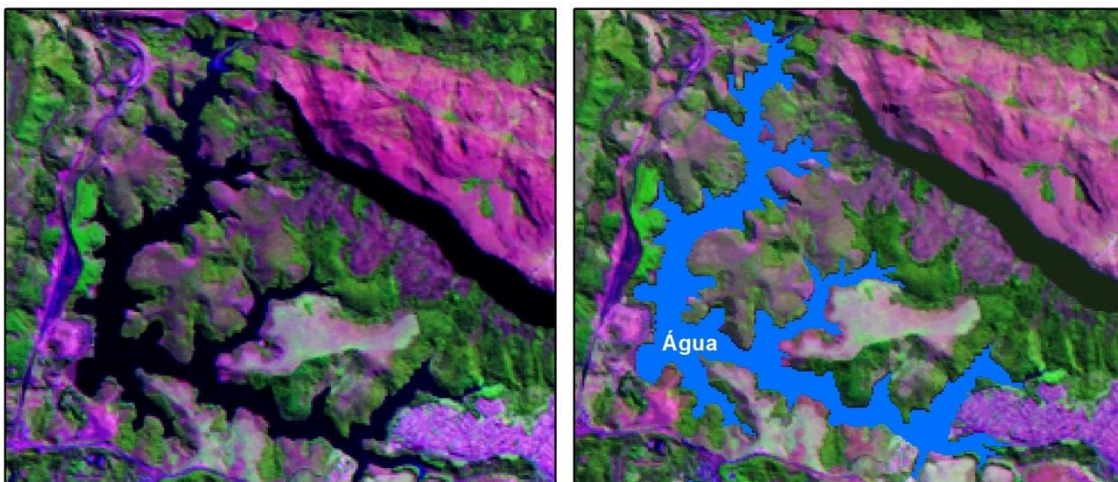


Figura 21: Imagem LANDSAT 5 apresentando a classe água.

5.3 Equação Universal de Perda de Solo – USLE.

O fator **erosividade (R)** anual da chuva na área a montante da PCH Salto do Paraopeba variou entre 6.403 a 6.634 $\text{Mj mm ha}^{-1}\text{h}^{-1}\text{ano}^{-1}$, conforme Figura 22. Segundo a chave de interpretação proposta por Carvalho (1994), Tabela 14, os valores alcançados são classificados com média-forte. Lanza (2011) obteve valores pouco diferente, mas que se mantiveram dentro da mesma classificação.

Tabela 14: Classe de interpretação da erosividade da chuva

.MJ mm ha- h-1 ano-1	CLASSE
$R \leq 2452$	BAIXA
$2452 < R \leq 4905$	MÉDIA
$4905 < R \leq 7357$	MÉDIA - FORTE
$7357 < R \leq 9810$	FORTE
$R > 9810$	MUITO FORTE

Fonte: Carvalho (1994) e Silva (2004)

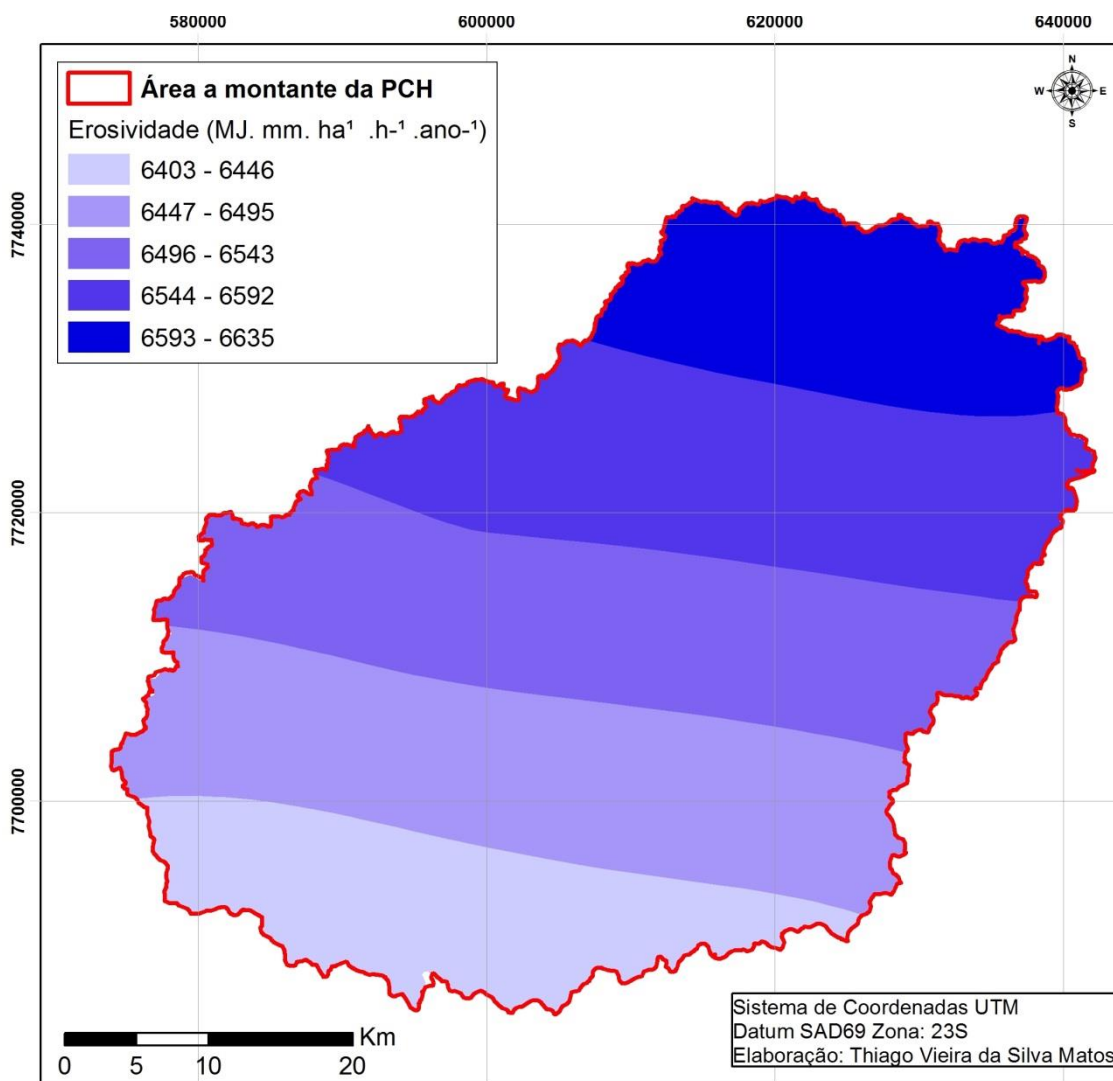


Figura 22: Mapa de erosividade

A distribuição espacial da erosividade demonstrou que os locais com os valores mais altos condizem com as áreas topograficamente mais elevadas. Mello *et al.* (2007) verificaram que o efeito orográfico de cada região tem influência no comportamento espacial da erosividade em Minas Gerais. Assim, as sub-bacias que fazem parte do complexo serrano, Maranhão-Pequiri e ribeirão Esmeril, são as com os índices mais elevados.

De acordo com a Tabela 15 e Figura 23 a **erodibilidade (K)** na área de estudo variou entre 0,013 e 0,06 Mg ha HJ⁻¹ mm⁻¹. Sua localização está diretamente relacionada ao mapa de pedológico da região, tendo em vista que este fator é uma característica intrínseca a cada classe de solo. Segundo UFV (2010), foi possível observar que na região de estudo existem associações de solos, assim foi necessária a ponderação dos valores de K.

Tabela 15: Erodibilidade das Unidades de Mapeamento

Solo	Código	K (Mg h MJ ¹ mm ¹)
Latossolo Vermelho	LVd2	0,013
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVAd1	0,02
Latossolos Vermelhos + Cambissolos Háplicos (60%+40%)	LVd8	0,0318
Latossolo Vermelho-Amarelo + Cambissolo Háplico (60%+40%)	LVAd10	0,036
Neossolos Litólicos + Afloramento Rochoso (60%+40%)	RLd4	0,02
Neossolos Litólicos + Cambissolos Háplicos + Argissolos Vermelho-Amarelos (40%+30%+30%)	RLd6	0,0408
Cambissolo Háplico	CXbd1	0,06
Cambissolos Háplicos + Neossolos Litólicos (60-40%)	CXbd13	0,05
Cambissolos Háplicos + Neossolos Litólicos + Latossolo Vermelho-Amarelo	CXbd21	0,0405
Argissolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos (60-40%)	PVAd10	0,0414

Fonte: Chaves (1994) APUD Borges (2009) e Lanza (2011)

Para ponderar os valores de erodibilidade, Borges (2009) sugeriu que existindo duas unidades taxonômicas, a primeira representa 60% da área e a segunda 40% e, quando fossem três, a primeira 40% e as outras duas 30%, no caso de quatro, a primeira representa 40% e as outras três 20% da área cada.

Das associações observadas a de Cambissolos e Neossolos Litólicos é a que apresenta a mais alta erodibilidade entre as associações. A associação de Cambissolos com Latossolos tende a diminuir a avaliação do valor de K. Já a de Neossolos, Argissolos Cambissolo apresentam erodibilidade alta. Dos solos não associados o Cambissolo Háplico é o de maior erodibilidade e o Latossolos- Vermelho de menor.

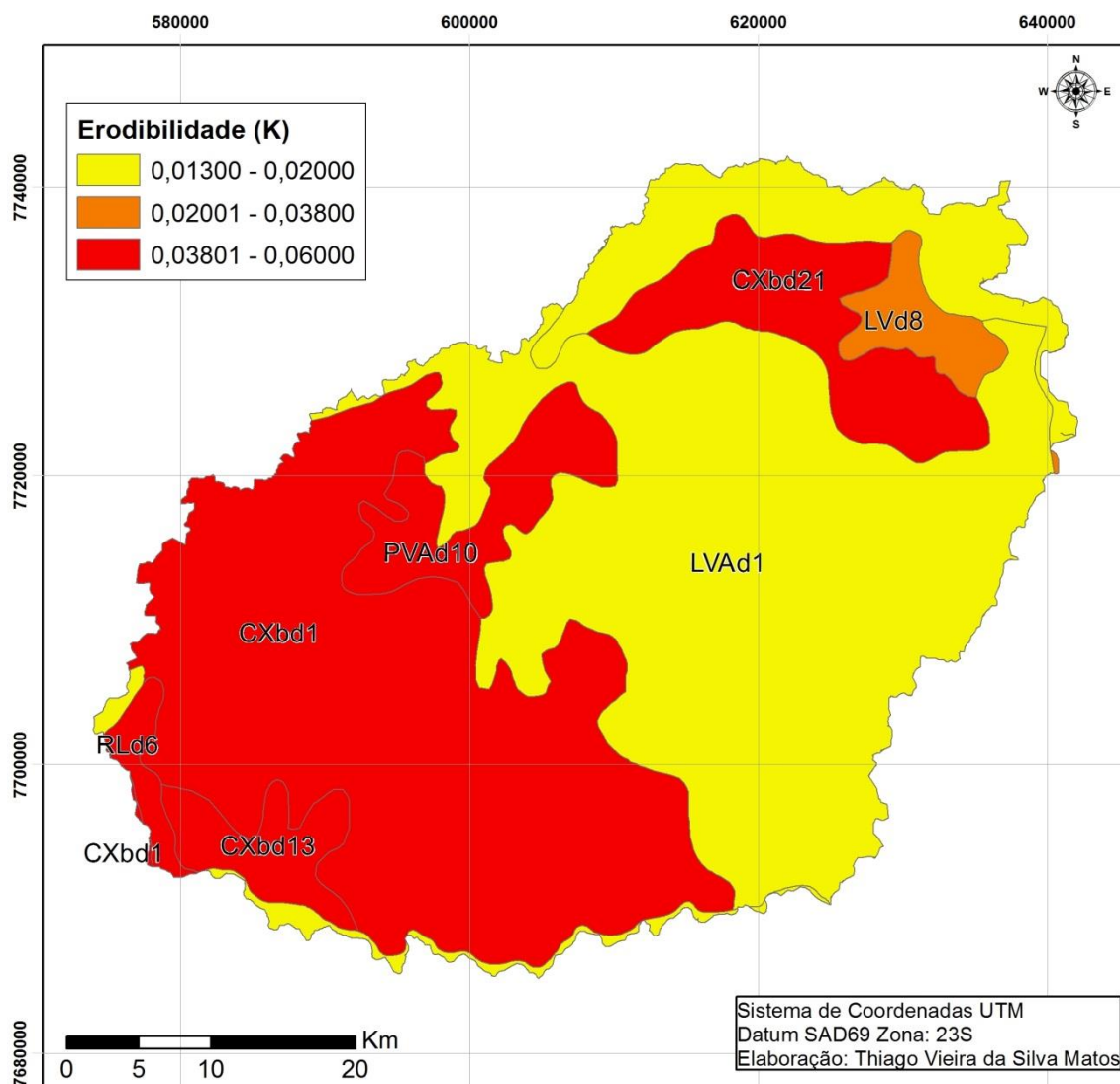


Figura 23: Mapa de erodibilidade

Considerando a chave de interpretação adaptada de Carvalho (1994), como se pode observar na Tabela 16, a maior parte da bacia é composta por solos de baixa erodibilidade, 48,24%, e alta erodibilidade, 49,54%. O restante consiste em erodibilidade média.

Tabela 16: Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação

Intervalos de valores de K	Classe de Interpretação	de Área (%)
$k < 0,02$	Erodibilidade Baixa	48,24
$0,02 < k < 0,038$	Erodibilidade Média	2,22
$k > 0,038$	Erodibilidade Alta	49,54

Dos solos existentes na área de estudo, os Latossolos são os mais resistentes, pois geralmente são bem drenados, profundos e coesos, além de possuírem alto grau de estabilidade e alta porosidade e permeabilidade.

Os argissolos apresentam movimentação de argila do horizonte superficial para o horizonte B, o acúmulo de argila nestes horizontes gera o entupimento dos poros dificultando a permeabilidade da água e favorecendo o aumento do escoamento superficial, conseqüentemente a erosão (EMBRAPA, 2006).

Os cambissolos são geralmente rasos, estruturados em blocos e de baixa permeabilidade. Jürgens & Fander (1993) avaliaram que a profundidade do solo é fator preponderante na erosão, pois solos rasos e de baixa permeabilidade favorece o deflúvio e a erosão acelerada. No contexto da área, os cambissolos são os que apresentaram maior erodibilidade.

Já os Neossolos Litólicos caracterizam-se por ocorrerem em área de declives acentuados, onde naturalmente a erosão é muito maior que a pedogênese. Além disso, são rasos, logo mais susceptível a erosão. Segundo Lanza (2011), na área de estudo esses solos se desenvolvem essencialmente sobre itabiritos e quartizitos. O material de origem quartzítica beneficia a formação de solo de textura arenosa; já os solos desenvolvidos sobre os itabiritos ocorrem cangas, que são resistentes à erosão mecanizada. Como não foi possível discernir as características dos Neossolos Litólicos, os valores de K foram superestimados para os solos coberto de canga.

A sub-bacia do rio Camapuã foi área de drenagem com maior predominância de Cambissolo, logo, alta erodibilidade. A sub-bacia do ribeirão Esmeril tem toda sua área composta de Neossolo Litólico associado a Afloramento rochoso, classificada como erodibilidade baixa.

Importante ressaltar que a escala espacial do mapeamento é um fator fundamental para a qualidade do resultado. Devido à complexidade deste tipo de mapeamento em escala local, boa parte dos mapeamentos é elaborados em escala regional, impossibilitando diferenciar as classes de solos com mais detalhamento.

O **fator topográfico (LS)** da equação universal USLE representa o efeito conjugado da declividade e do comprimento de rampa sobre a erosão, este fator é adimensional.

Uma das questões analisadas na pesquisa foi a sensibilidade dos parâmetros da USLE a variação espacial das informações disponíveis. A análise desta variação partiu da utilização de fontes de dados com resolução espacial diferente; Neste caso os Modelos Digitais de Elevação (MDE) SRTM, com pixels de 90 metros, e modelos Aster, com pixels de 30 metros de resolução.

A revisão bibliográfica apontou a existência de metodologias distintas para a obtenção do fator. As formas evoluíram de acordo com os avanços tecnológicos e a necessidade de aplicação da USLE. Neste trabalho foram utilizadas as metodologias de Bertoni (1959), para o cálculo conjunto dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S), e de Desmet e Goovers (1996) para o cálculo do comprimento de rampa (L) e de McCool *et al* (1987) para declividade (S).

Inicialmente o cálculo foi desenvolvido considerando a parcela na qual o experimento era executada. Mas as metodologias evoluíram e passaram a considerar o conceito de área de contribuição na estimativa do comprimento de rampa. Autores como Quinn *et al.* (1991); Desmet e Goovers. (1996) e Tarboton (1997) desenvolveram algoritmos para o cálculo automático do comprimento de rampa (L) a partir do conceito de área de contribuição, em ambiente SIG, baseado em MDE.

Na Tabela 17, observa-se que os valores baixos foram os que apresentam maior concentração quando calculados segundo a metodologia Bertoni (1959), no modelo ASTER e SRTM. Na Tabela 18, os valores, segundo as metodologias de Desmet e Goovers (1996) e McCool *et al* (1987) nos dois MDEs, apresentaram o mesmo comportamento da tabela anterior.

De acordo com Stein *et al* (1987), de uma maneira geral, os valores elevados correspondem a relevos mais energéticos. Em relevos suaves, os valores mais altos do fator topográfico correspondem ao comprimento de rampa e em relevos mais acentuados, os valores do fator são influenciados quase que exclusivamente pela declividade.

Tabela 17: Classes de distribuição do fator topográfico: Bertoni (1959)

LS Bertoni (1959)					
Aster 30 metros			SRTM 90 metros		
Classe LS (adimensional)	Área Aster (%)	Freq. Acumulada	Classe LS (adimensional)	Área SRTM (%)	Freq. Acumulada
0 – 2	57.35	57.35	0 – 2	37.28	37.28
2 – 5	32.11	89.46	2 – 5	43.26	80.54
5 – 10	9.59	99.05	5 – 10	16.70	97.24
10 – 20	0.90	99.95	10 – 20	2.53	99.77
20 – 40	0.04	99.99	20 – 40	0.20	99.96
> 40	0.01	100.00	> 40	0.04	100.00

TABELA 18: Classes de distribuição do fator topográfico L: Desmet & Goovers (1996), S McCool (1987)

L: Desmet & Goovers (1996), S McCool (1987)					
Aster 30 metros			Aster 90 metros		
Classe LS (adimensional)	Área Aster (%)	Freq. Acumulada	Classe LS (adimensional)	Área SRTM (%)	Freq. Acumulada
0 – 2	52.55	52.55	0 – 2	40.67	40.67
2 – 5	35.70	88.25	2 – 5	36.86	77.53
5 – 10	11.22	99.47	5 – 10	18.91	96.44
10 – 20	0.49	99.96	10 – 20	3.35	99.79
20 – 40	0.02	99.98	20 – 40	0.21	99.99
> 40	0.02	100.00	> 40	0.01	100.00

Neste sentido, Costa (2005) classificou os valores de LS acima de 8 como altos. Pois, os valores acima de 15% de declividade pertencem à classe alta do fator topográfico, como observado na Figura 24. Nesta mesma direção, McCool *et al* (1987) corroboram ao afirmarem que a perda de solo é consideravelmente mais sensível às mudanças de declividade do que à mudança de comprimento da rampa.

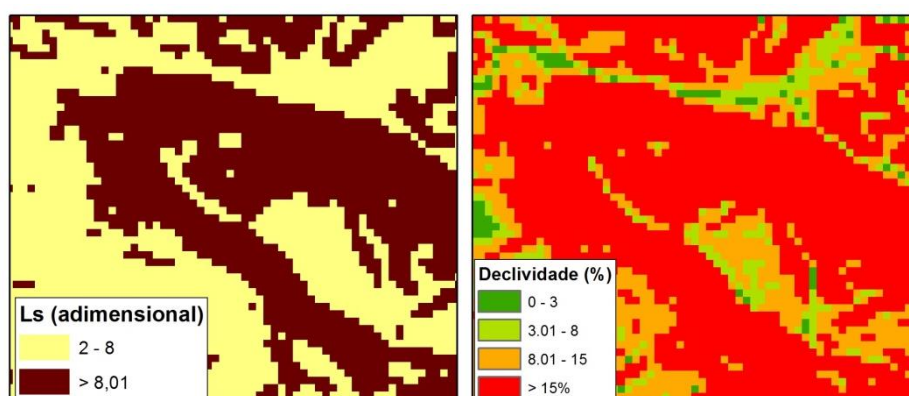


Figura 24: Relação LS e Declividade

A figura 25 apresenta a distribuição espacial das metodologias aplicada sobre os dois modelos de elevação. Espacialmente observa-se que os resultados também possuem uma conformação semelhante. A Figura 26 permite avaliar que Bertoni (1959) apresenta o fator de maneira localizada, pois como já frisado anteriormente, esta metodologia foi concebida na lógica da parcela. Já a Desmet e Goovers (1996) apresentam resultados parecidos com Bertoni (1959), mas por considerar a área a montante apresenta pontos superestimados, pois seu cálculo considera o fluxo acumulado na estimativa. Desta forma, pode-se considerar que estes pontos apresentam o aporte a montante acumulado.

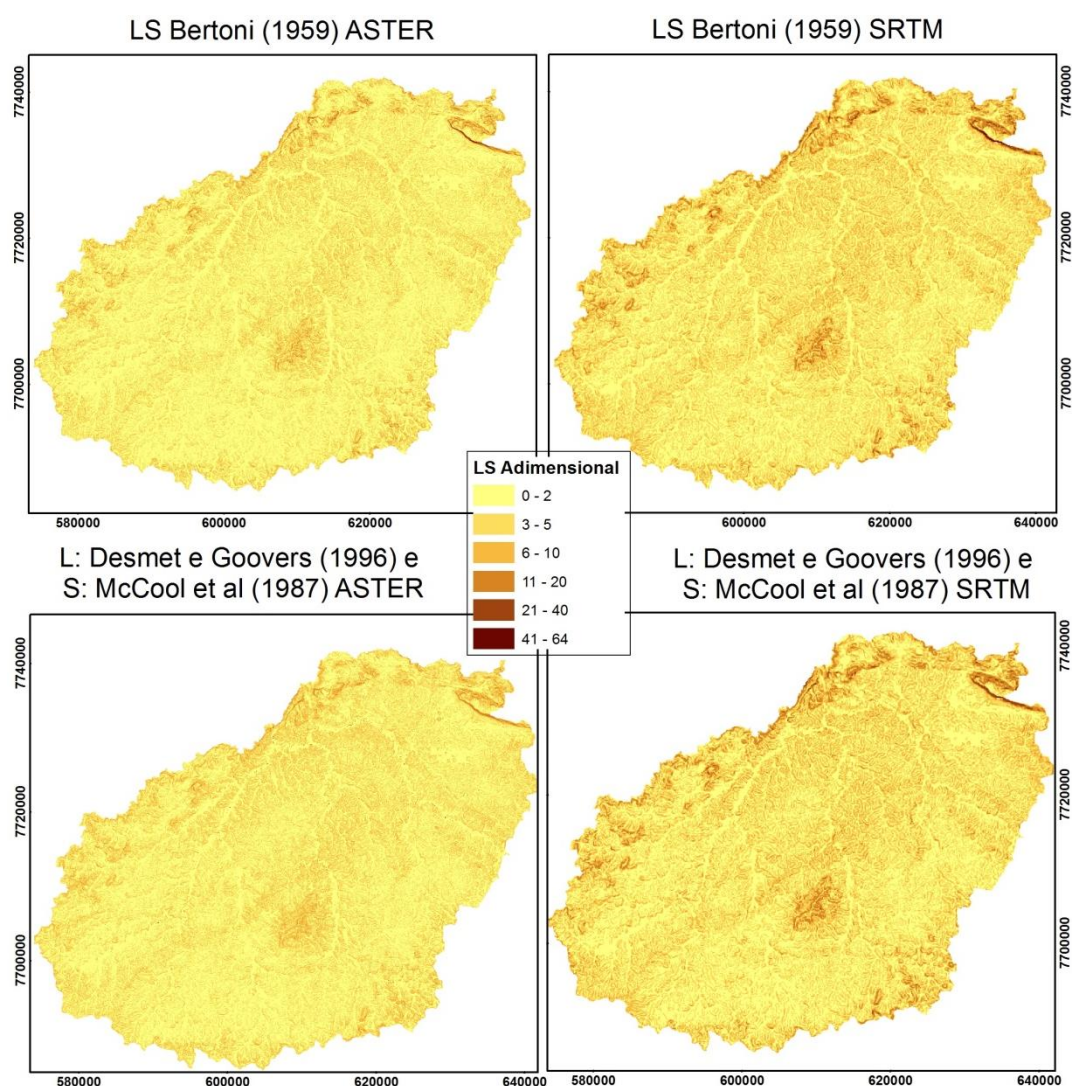


Figura 25: Distribuição espacial dos resultados de LS.

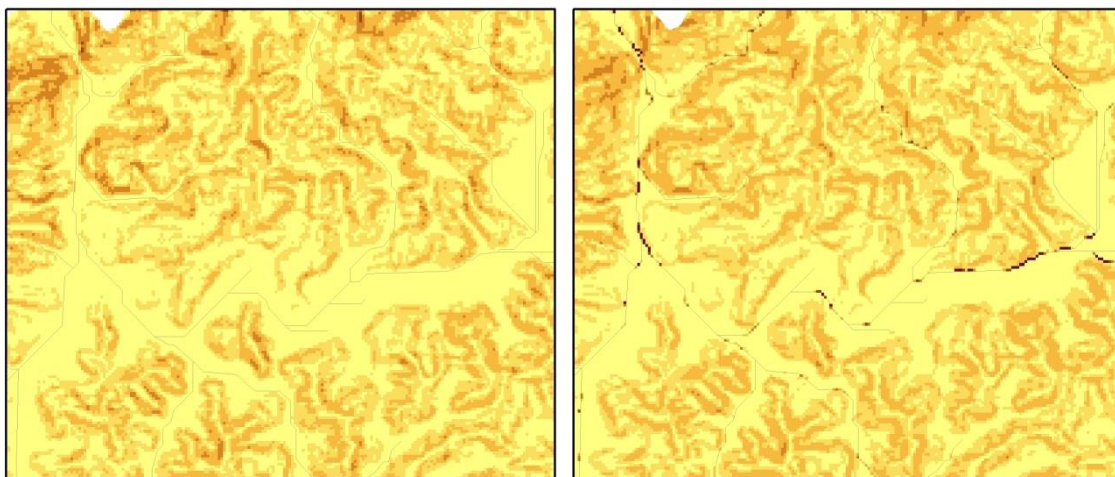


Figura 26 – Comparação do Fator LS Berton (1959) e Desmet e Goovers e McCool *et al* (1987)

Com o intuito de fazer uma análise mais aprofundada do fator, e levando em consideração o MDE com melhor resolução e a metodologia mais moderna, a figura 27 representa o resultado do fator topográfico estimado no modelo ASTER seguindo as metodologias de Desmet e Goovers (1996) para o comprimento de rampa e McCool *et al* (1987) para declividade.

Nela é possível observar que os valores da classe de 0 – 2 estão localizados nas áreas de várzea dos principais rios e ribeirões e nas áreas deprimidas. Já os valores mais altos, acima de 20, estão nos complexos de serras. O que confirma a relação elaborada por Stein *et al* (1987) citada acima. Pois, como pode-se observar, as áreas serranas do quadrilátero ferrífero, localizada ao norte da área de estudo, foram as regiões que se observou os maior valores de LS.

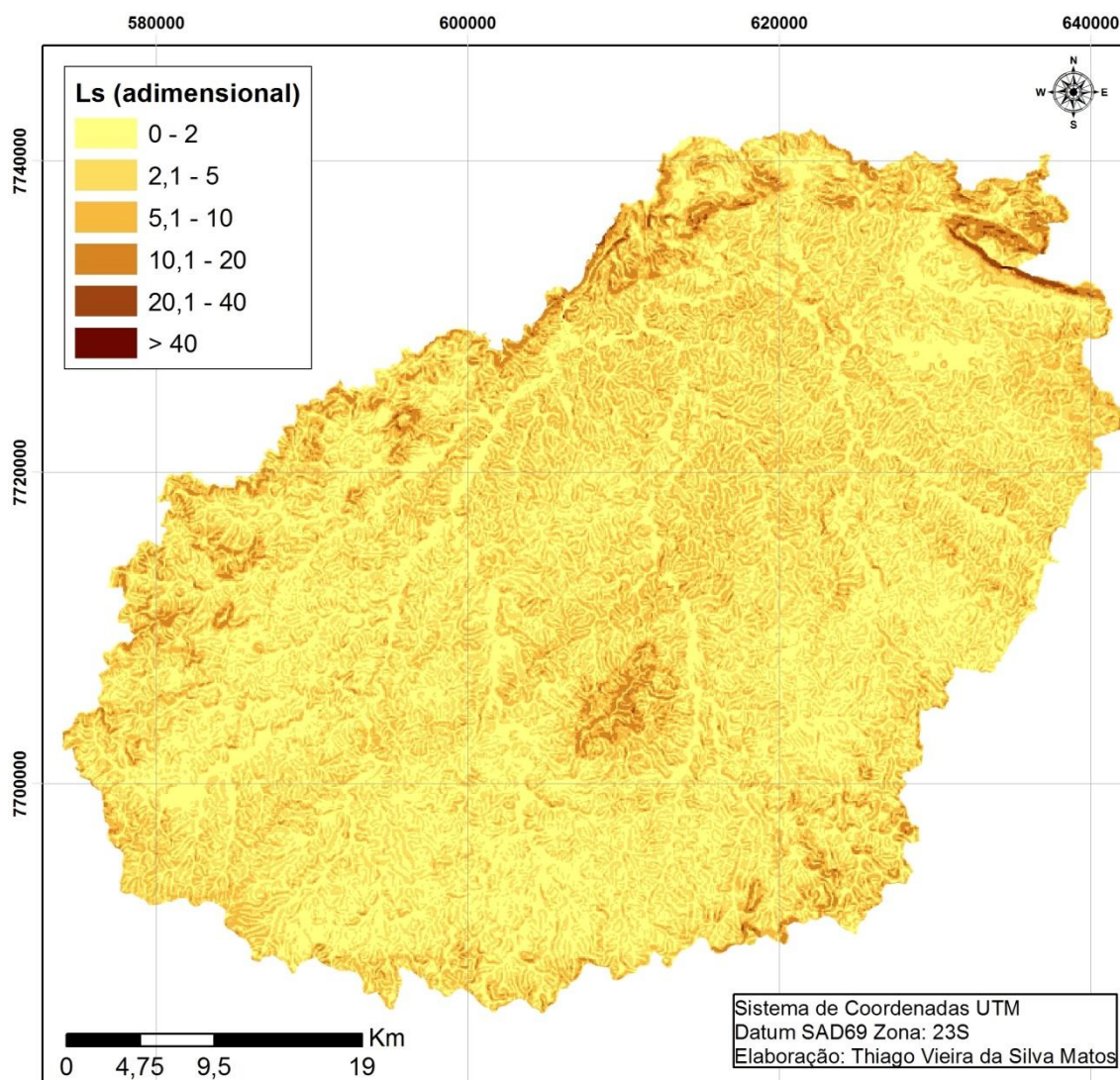


Figura 27: Mapa do fator topográfico

No que diz respeito às diferenças relacionadas à escala da informação, foi possível perceber que os valores dos modelos apresentaram diferenças. Na Figura 28, observa-se a amplitude dos valores determinados segundo o método de Bertoni (1959) no modelo SRTM (90 metros) e do modelo ASTER (30 metros). A diferença é de quase o dobro entre os modelos. Isso ocorreu devido à escala do MDE no cálculo do comprimento de rampa. No modelo SRTM, o comprimento é de 90 metros, quando a direção do fluxo era reta, e 127,26 quando diagonal (Figura 29). No modelo ASTER os valores são 30 reta e 42,42 diagonal.

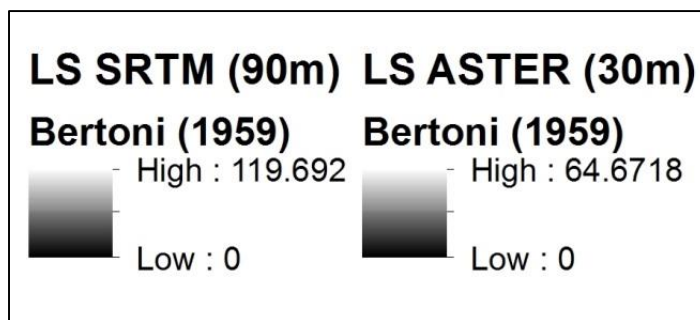


Figura 28: Valores LS Bertoní (1959) nos MDEs SRTM e ASTER

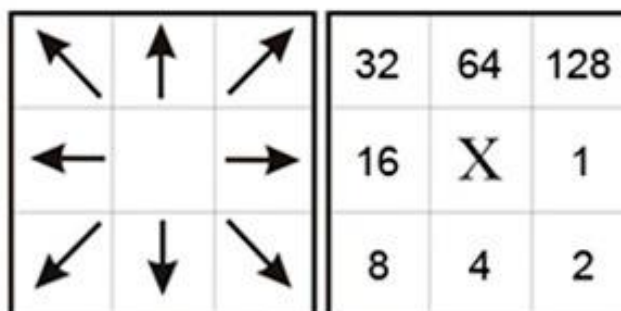


Figura 29: Comprimento de rampa com relação a direção de fluxo.

Os valores obtidos segundo a metodologia Desmet e Goovers (1996) para o comprimento de rampa e McCool *et al.* (1987) para declividade apresentaram, no modelo SRTM, valor máximo de 112. Já no modelo ASTER o valor computado foi de 6.954. (Figura 30). De acordo com Chaves (2010), isso ocorre devido ao efeito da escala do mapa. Wu *et al.* (2005) apontaram que o fator LS aumentam exponencialmente com a redução da célula do mapa, sugerindo que o resultado da equação seja extremamente influenciado pela escala de trabalho; logo o mesmo acontece com a escala do dado.

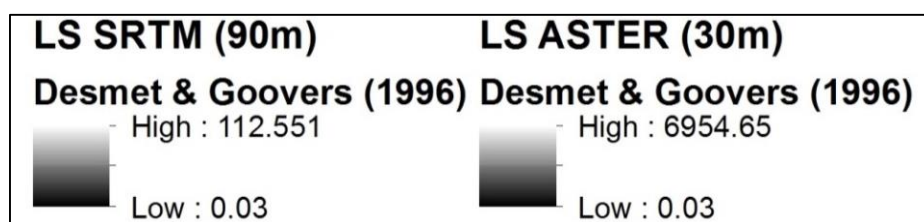


Figura 30: Valores mínimos e máximos de LS nos MDEs SRTM e ASTER

O ultimo fator da equação é o de **cobertura e manejo e práticas conservacionistas (CP)**. Na área de estudo, há valores que variam de 0 a 0,2, de acordo com a classificação de Stein *et al.* (1987).

Baseado no mapa de uso do solo, 1º item do capítulo resultados, o fator CP varia de 0 a 1, de forma que um solo muito protegido esteja mais próximo de 0 e outro sem

proteção, mais próximo de 1. Sua distribuição pode ser observada na Figura 31 e Tabela 19.

Tabela 19: Distribuição dos valores de CP

Classe de Uso do solo	Classe de CP	Área (%)
Água, Urbano e Mineração	0	5.06
Vegetação Arbórea	0,00004	24.44
Silvicultura	0,0001	4.31
Veg. Campestre e Pastagem	0,01	61.60
Cultura Temporário ou Solo Exposto	0,2	4.60

Fonte: Stein *et al* (1987)

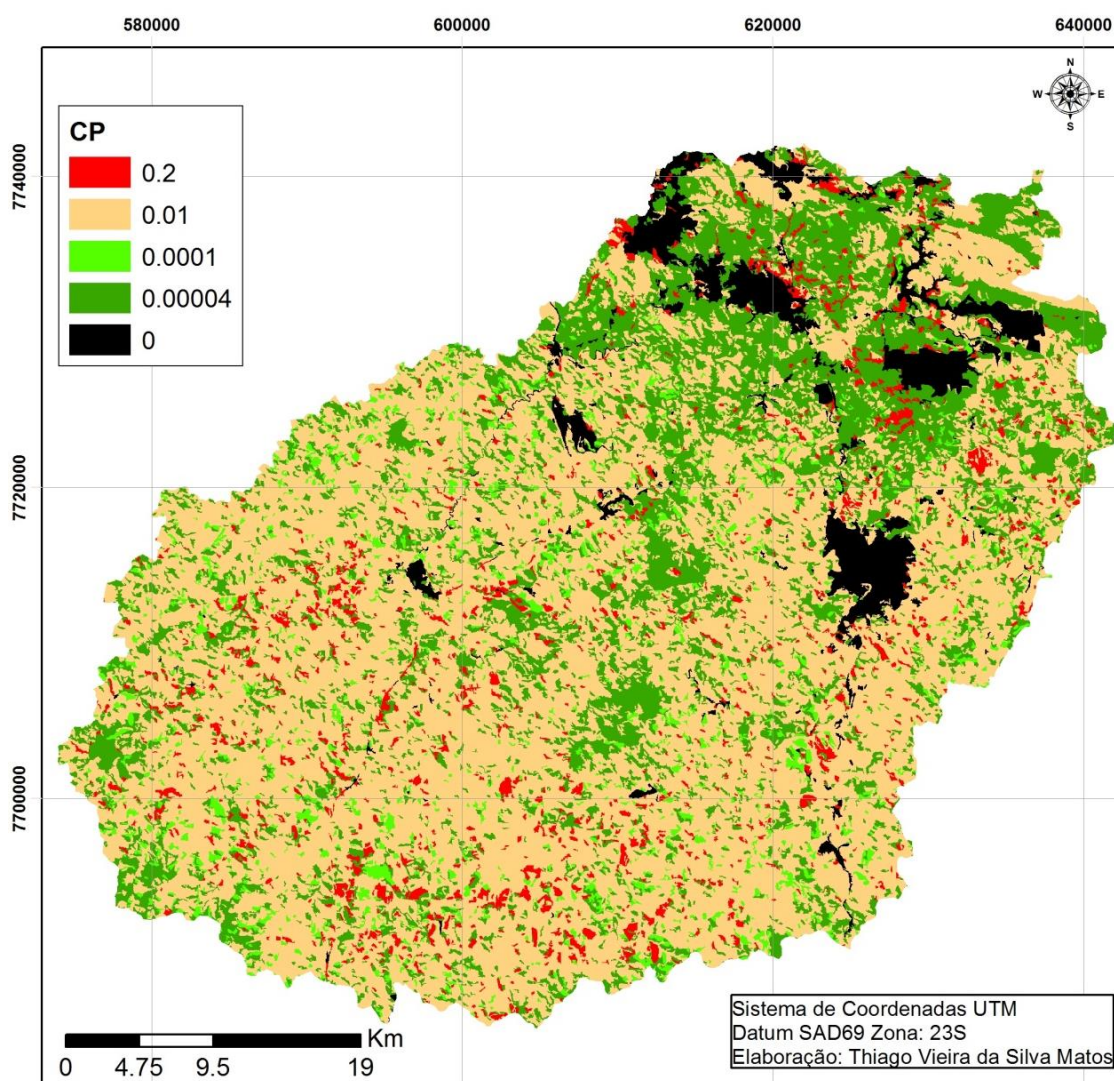


Figura 31: Mapa do fator CP

De acordo com a classificação de Stein *et al* (1987) os usos antrópicos como Urbano, Industrial e Mineração são classificados com potencial zero, uma vez que, para os autores, essa tipologia já não possui mais solo para ser erodido. Nesta classe também se enquadra o uso corpos d'água.

Com relação à ação da água como agente erosivo no solo, a classe vegetação arbórea é a cobertura que apresentou maior proteção. As amostras aqui consideradas eram todas aquelas que possuíam alta densidade. De acordo com Martins *et al* (2010), floresta nativa possibilita a produção de uma abastada camada de serrapilheira, que proporciona proteção do solo, como pode-se observar na Figura 32. Na área de estudo esta tipologia encontra-se bastante fragmentada, possuindo maior concentração na sub-bacia Maranhão-Pequeri



Figura 32: Serrapilheira numa área de vegetação arbórea no ribeirão Esmeril.

A vegetação campestre caracteriza-se por vegetação mais baixa composta por gramíneas naturais e arbustos. Devido ao seu porte, essa tipologia protege menos o solo em relação à vegetação arbórea. Mas por ocorrer geralmente sobre solos bastante frágeis e com topografia escarpada, essa tipologia é eficiente no controle da erosão e na estabilidade das vertentes.

No que diz respeito ao controle da erosão, a silvicultura pode ser considerada uma prática agrícola sustentável. Apesar de apresentarem perdas maiores que as de vegetação nativa, o reflorestamento apresentam bom grau de cobertura. Lanza (2011) destaca ainda que quanto mais perdurar o reflorestamento maior a tendência de

diminuição das perdas de solo em área de plantio de eucalipto. Pois haverá tempo suficiente para que as árvores alcance tamanho necessário e que suas copas se entrelacem formando um dossel de folhas denso (Figura 33). Além de o acúmulo de serrapilheiras que protege o solo da energia das gotas de chuva.

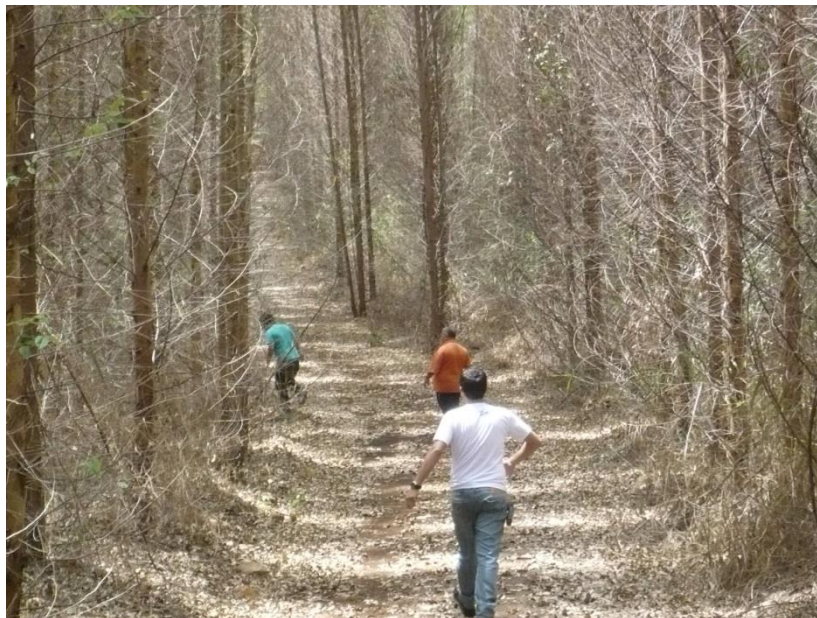


Figura 33: Reflorestamento de Eucalipto de Alto porte.

A pastagem é caracterizada pelo tipo de manejo adotado. Segundo Lanza (2011) na região há o predomínio da pecuária extensiva, entretanto com uma diversidade de condições de rebanho e capim. Em determinados casos, não existe rotação de pasto ou técnica de manejo que assegura a qualidade das glebas. Em algumas situações ocorre superpastejo, manejo que compacta o solo logo diminuindo a capacidade infiltração da água. Contudo, existem muitas áreas de pastos com cobertura densa de gramíneas junto com a presença de arbustos.

Culturas temporárias e solo exposto formam a última classe do fator CP. Juntas, consistem nos dois tipos de uso do solo que mais contribuem no aumento da taxa de perda de solo. Lavouras temporárias ou anuais podem em alguns períodos do ano não possuírem nenhuma cobertura do solo, em razão da entressafra. O solo exposto é a pior situação em que o solo pode se encontrar, pois a inexistência de cobertura incide em altas taxas de perda de solo.

Segundo Lanza (2011) a vulnerabilidade à erosão de áreas de culturas temporárias é muito alta, e pode ser agravada quando não existir sistemas de preparo e manejo

adequados. Os procedimentos de preparação do solo desempenham um papel fundamental nessa categoria de lavoura, principalmente devido à frequência em que são efetuadas as interferências no solo.

5.4 Potencial erosivo da montante da PCH Salto do Paraopeba

A Equação universal de perda de solo apresenta o potencial de perda de solo por erosão laminar. Inicialmente a USLE foi idealizada para mensurar valores quantitativos de perda de solo. Porém, a aplicação da equação em escala regional deve ser feita com ressalvas. O modelo não contempla as perdas por erosão linear além de não simular apropriadamente o fenômeno em vertentes côncavas. Dessa forma, os resultados aqui são interpretados de forma qualitativa.

Nesse sentido, Carvalho (1994) propôs a adoção de uma chave de interpretação para sistematizar a análise do processo erosivo. Para isso, procurou conceber qual era a máxima perda de solo aceitável avaliando-a como tolerâncias de perda de solo. Essa tolerância é variável com o tipo de solo e corresponde ao valor que permita o uso contínuo do solo sem que seu potencial produtivo seja comprometido.

Segundo Carvalho (1994), nas normas americanas os valores de tolerância variam de 3 a 12 t/(ha.ano). No Brasil Leinz e Leonardos (1977) determinaram que a tolerância de perdas de solo varia de 4,2 a 15 t/(ha.ano). Desta forma, Carvalho (1994) estabeleceu a chave de interpretação, Tabela 20, onde pode-se observar que os valores das classes III e IV representam erosão acima do limite tolerável.

Tabela 20: Classe de perda de solo

Classes	Erosão Hidrica (t ha ano)
I - nula a pequena	Até 10
II – moderada	10 a 15
III – forte	50 a 200
IV - muito forte	> 200

Fonte: Carvalho (1994)

Borges (2009) e Lanza (2011) aplicaram a USLE em outras sub-bacias do rio São Francisco e adaptaram a classificação de Carvalho (1994) em seis classes. Ao invés de considerarem apenas a classe III – forte (50 a 200), os autores a subdividiram em: média

(15-50), Média a Forte (50-120) e Forte (120-200), como pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21: Tolerância de classes de Potencial erosivo

Taxa de Perda de solo (ton/há.ano)	Classes de Interpretação
< 10	Nula a Pequena
10-15	Moderada
15-50	Média
50-120	Média a forte
120-200	Forte
> 200	Muito forte

Fonte: Borges (2009) e Lanza (2011)

Essa adaptação se justifica, pois a aplicação da USLE em ambiente SIG possibilita a obtenção de valores em diversas escalas e conseqüentemente em diversos graus de precisão. Assim, uma única classe que conglomerar áreas de perda de 50 a 200 t/(ha.ano) diminui o detalhe do diagnóstico. Uma vez que uma área com potencial de 190 t/(ha.ano) requer de mais atenção que uma com potencial de 55 t/(ha.ano). Entretanto cabe ressaltar que o limite de tolerância levantado por Leinz e Leonardos (1977) permanece, ou seja, valores acima de 15 t/(ha.ano) estão acima do tolerável.

A Tabela 22 apresenta valores da USLE computados utilizando o Fator topográfico (LS) fundamentado nas metodologias de Bertoni (1959) para o cálculo conjunto de LS e a Tabela 23 os valores segundo Desmet e Goovers (1996) para o comprimento de rampa (L) e McCool *et al.* (1987) para a declividade (S) nos modelos digitais de elevação ASTER e SRTM.

TABELA 22: USLE com LS segundo Bertoni (1959) nos MDEs ASTER e SRTM

USLE com LS Método Bertoni (1959)					
ASTER 30 Metros			SRTM 90 Metros		
Taxa de Perda de solo (ton/há.ano)	Classes de Interpretação	Área (%)	Taxa de Perda de solo (ton/há.ano)	Classes de Interpretação	Área (%)
ate 10	nula	83.58	ate 10	nula	76.02
15	moderada	6.42	15	moderada	8.99
50	média	6.66	50	média	10.95
120	média a forte	1.34	120	média a forte	1.42
200	forte	0.88	200	forte	0.87
> 200	muito forte	1.12	> 200	muito forte	1.75

TABELA 23: USLE com L segundo Desmet e Goovers (1996) e S McCool *et al* (1986) nos MDEs ASTER e SRTM

USLE com L Desmet e Goovers (1996) e S McCool <i>et al</i> (1987)					
ASTER 30 Metros			SRTM 90 Metros		
Taxa de Perda de solo (ton/há.ano)	Classes de Interpretação	Área (%)	Taxa de Perda de solo (ton/há.ano)	Classes de Interpretação	Área (%)
ate 10	nula	82.06	ate 10	nula	77.20
15	moderada	6.97	15	moderada	7.59
50	média	7.55	50	média	11.22
120	média a forte	1.35	120	média a forte	1.46
200	forte	0.84	200	forte	0.86
> 200	muito forte	1.24	> 200	muito forte	1.68

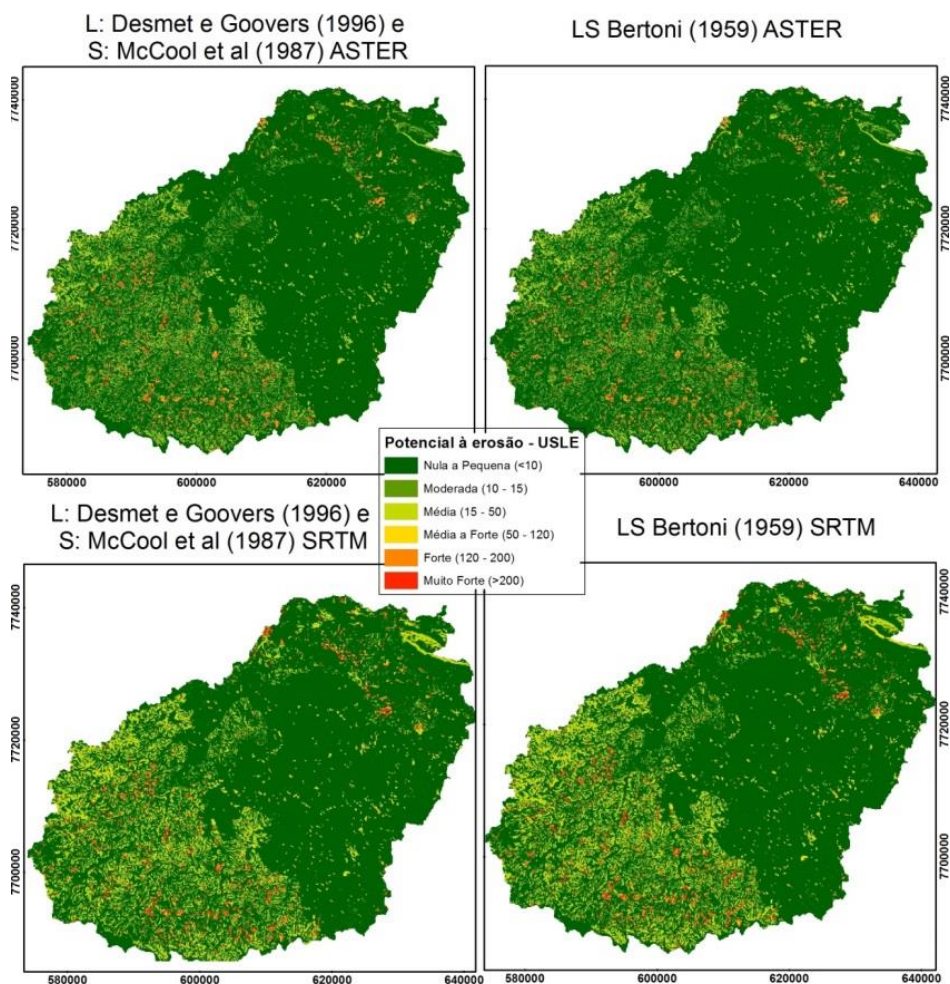


Figura 34: Mapa de Potencial Erosivo baseado em todos os MDEs e metodologias de cálculo do Fator LS

De acordo com as Tabelas 22 e 23, o potencial de perda de solo por erosão laminar nula ou pequena, em todas as metodologias de LS e modelos digitais de elevação, ocupa mais 75% da área.

As classes moderada e média acontecem em toda a área e juntas ocupam entre 14% do território nos modelo ASTER e 18% no modelo SRTM, em ambos métodos. É possível notar na Figura 34 que sua ocorrência esta estreitamente relacionada à localização de solos mais susceptíveis a erosão, como o Cambissolo. Observa-se também que apesar de não possuir uma grande extensão na área de estudo, a classe média e forte ocorre sobre toda região. Cabe destacar que estas classes ocorrem em regiões imediatas as classes de maior potencial. Menos na região de Latossolos onde usualmente incide isolada.

A influência do uso do solo é destacada na região onde a erosão foi classificada como forte e muito forte. As áreas que possuem os maiores valores de CP foram as apresentaram os maiores potenciais de perda. Sua maior incidência é em regiões de Cambissolos, seguido das regiões de declividades altas nos complexos de serras.

Cerca de 85% da bacia do Rio São Francisco possuem perdas a abaixo de 10 t/(ha.ano) (CHAVES, 1994 apud LANZA, 2011). Na bacia do rio Carinhanha, no médio São Francisco, Borges (2009) apurou que 89,37% da área têm perdas abaixo de 10 t/(ha.ano). Mata (2009) estimou que 68,87% da área da bacia do rio Urucuia, também no médio São Francisco, tem perdas inferiores a 15 t/(ha.ano). Lanza (2011) estimou o potencial erosivo da parta alta e média do rio Paraopeba, alto São Francisco, e apurou que 45,8% da área têm perdas abaixo de 10 t/(ha.ano).

A área a montante da PCH Salto do Paraopeba encontra-se localizada no alto Paraopeba. Lanza (2011) aplicou a USLE no médio e alto Paraopeba e determinou que 45,8% da área têm perdas abaixo de 10 t/(ha.ano). No presente trabalho, a área da montante da PCH apresentou resultados acima de 75% em todas as aplicações.

Essa diferença pode ser explicada por dois pontos: 1. a escala da base de pedologia utilizada nas pesquisas para determinar o fator Erodibilidade: o trabalho de Lanza (2011) utilizou-se de uma com escala de 1:250.00, já a presente pesquisa baseou-se em outra de 1:600.00; 2. Lanza (2011) classificou o uso do solo com imagens do sensor ASTER, que possui resolução espacial de 15 metros, enquanto na pesquisa, as imagens foram baseadas em LANDSAT 5, que possui resolução de 30 metros. A resolução de 15 metros da imagem ASTER permite uma classificação mais detalhada.

Desta forma, foi possível verificar que a Equação Universal de Perda de Solo – USLE - é sensível à variação espacial do dado no qual será obtido os parâmetros da equação. Quanto melhor a resolução espacial da informação é melhor sua resposta e mais detalhados serão os resultados.

Por compreender que a variação entre todas as aplicações não foi significativa, a Tabela 24 apresenta o potencial erosivo aplicação com o fator topográfico segundo Desmet e Goovers (1996) e McCool et al (1987) no modelo de elevação ASTER. Nesta tabela observou-se que as sub-bacias do Ribeirão Esmeril e Camapuã foram as que apresentaram maior potencial à ocorrência de erosão laminar moderada e média. O ribeirão Esmeril apresentou a maior concentração de áreas com média a forte, forte e muito forte potencial. A sub-bacia do rio Camapuã apresentou pouco mais de 135 km² de área de potencial moderado e pouco mais de 147 km² como média.

Tabela 24: Potencial erosivo por Sub-bacia.

Sub-bacia	Área (Km ²)	Classes de Interpretação (%)					
		nula	moderada	média	média a forte	forte	muito forte
Córr. Forno Maranhão-	2.26	99.65	0.35	-	-	-	-
Pequiri	1351.67	91.81	2.68	2.88	1.43	0.62	0.58
Camapuã	1102.34	70.07	12.26	13.35	1.22	1.06	2.05
Rib. Esmeril	8.70	72.00	7.29	4.29	5.77	7.11	3.53
Vale Paraopeba	1.40	99.16	0.27	0.26	0.13	0.06	0.13
Área 1	1.33	89.24	2.56	0.41	2.10	4.41	1.29
Área 2	0.70	99.36	0.64	-	-	-	-
Área 3	0.22	98.80	1.20	-	-	-	-
Área 4	0.35	97.95	2.05	-	-	-	-
Área 5	0.66	98.14	1.86	-	-	-	-
Área 6	0.33	94.46	5.54	-	-	-	-
Área 7	0.30	100.00					

Por se localizar no complexo serrano da área de estudo, os principais fatores que influenciam os resultados do ribeirão Esmeril são os valores do fator topográfico associado ao uso da terra. A bacia do Camapuã apresenta resultados que indicam que os fatores que influenciaram foram a alta erodibilidade dos Cambissolos associado ao uso da terra com alto potencial erosivo.

5.5 Comparação dos resultados da USLE com o Mapa de Vulnerabilidade à erosão do ZEE-MG

Como citado na Metodologia, o mapa de vulnerabilidade do ZEE-MG é produto da combinação do risco potencial de erosão, a intensidade da chuva e a exposição do solo ao impacto das gotas de chuva. O risco potencial à erosão é um produto do cruzamento da erodibilidade e declividade. De acordo com a Tabela 25, pode-se observar que quase a metade da área possui *médio* risco de erosão.

Tabela 25: Risco potencial de Erosão ZEE-MG

Risco Potencial de Erosão	Área %
Muito Baixo	8.24
Baixo	27.49
Médio	46.56
Alto	1.76
Muito Alto	15.95

A Figura 35 demonstra a influência do mapa pedológico no resultado do risco. Onde se localizam os solos com maior erodibilidade, também está localizada grande parte das áreas com *médio* e *muito alto* risco de erosão. E onde estão os solos de menor erodibilidade, localizam-se as maiores concentrações de baixo risco. Pode-se considerar que a distribuição espacial das áreas de alto risco é influenciada pela pedologia.

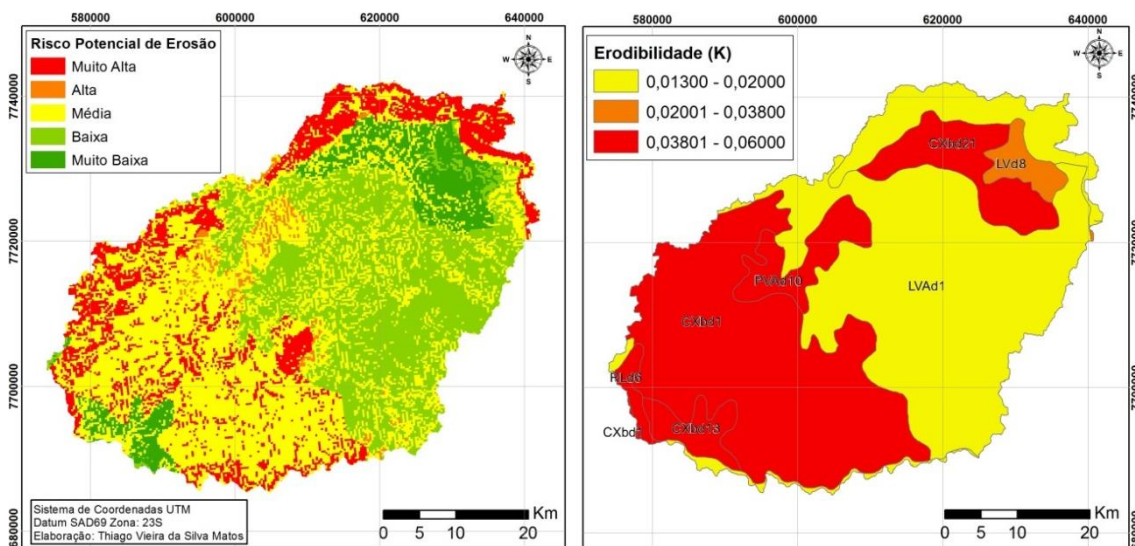


Figura 35: Risco potencial de erosão e Erodibilidade

Contudo, por ser um produto derivado de apenas dois fatores, é presumível que seu resultado seja influenciado quando um fator possuir valores extremo, tanto muito alto quanto muito baixo. A declividade apresenta elevados valores na porção norte da área

de estudo, na região serrana. Onde foi observado a concentração de área de *muito alto* risco. Na região do sopé da área serrana, área de baixa declividade, localiza-se solo altamente erodível, e devido os baixos valores da declividade, a influência da topografia resultou na classificação *muito baixa* . Por a declividade ser um fator mais local, sua influencia espacial é pouco menor, mesmo assim não menos importante.

Os outros elementos combinados para gerar a vulnerabilidade à erosão foram à intensidade da chuva e a exposição do solo ao impacto da gota de chuva. Na metodologia do ZEE não foi esclarecido à forma que estes dois elementos foram determinados. Notou-se apenas, que a intensidade da chuva foi determinada de forma regional, pois no resultado disponibilizado, toda a área de estudo é classificada como de baixa intensidade de chuva.

A exposição do solo ao impacto da gota de chuva pode ser entendida como o fator de uso e cobertura do solo da USLE, o fator combinado CP. Na Tabela 26, observa-se que exposição do solo do ZEE está concentrada entre *média* e *alta* . Analisando a Figura 36, nota-se que as regiões classificadas com exposição *muito alta* , são regiões urbanas, de mineração ou indústria. Regiões de fator CP zero na USLE. Nas regiões onde a exposição foi classificada *baixa* , coincide com área de vegetação arbórea, com fator CP de 0.00004.

Tabela 26: Exposição do solo ao impacto da gota de chuva

Exposição do Solo	Área %
Baixa	12.79
Média	50.51
Alta	31.59
Muito Alta	5.11

Fonte: ZEE-MG

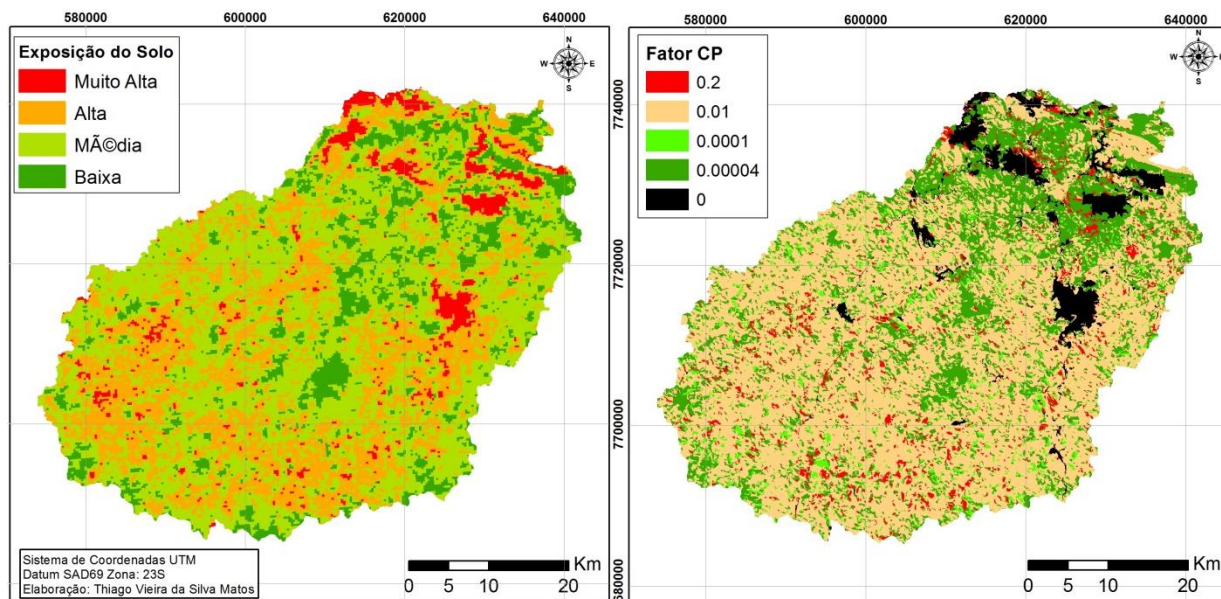


Figura 36: Exposição do solo e Fator CP

Interessante apontar que em alguns pontos os resultados de exposição do solo e CP são completamente antagônicos. Onde a mapa de exposição do solo indicou área de *muito alta* exposição do solo ao impacto da chuva, no mapa de CP é classificada como 0, ou seja, baixo potencial erosivo. Então o que para o resultado de exposição do solo é altamente erosivo para o CP é nulo.

De acordo com a Tabela 27, o limite montante da PCH Salto do Paraopeba tem sua maior concentração de área classificada como *média* vulnerabilidade à erosão. Mas observa-se também que valores de *baixa*, *alta* e *muito alta* são expressivos. Em contraponto com a USLE, observa-se que os resultados são opostos.

Tabela 27: Vulnerabilidade à erosão e USLE

Vulnerabilidade à erosão		USLE – Classes de Interpretação	Área (%)
Descrição	Área %		
Muito Baixa	1,48	Nula a pequena	82,06
Baixa	28,76	Moderada	6,97
Média	32,76	Média	7,55
Alta	21,88	Média a forte	1,35
Muito Alta	15,11	Forte	0,84
		Muito forte	1,24

Na Figura 37, é nítido que o resultado das duas metodologias foi divergente. Onde a vulnerabilidade à erosão determinou *muito alta* e *alta*, a metodologia USLE apresentou classes que variam de *nulo* à *médio* potencial. A porção norte da área de estudo

apresenta a maior discrepância de resultados. Nessa região a vulnerabilidade apresenta resultado predominantemente classificado como *muito alto*; já na USLE a predominância é de potencial *nulo* de perda de solo.

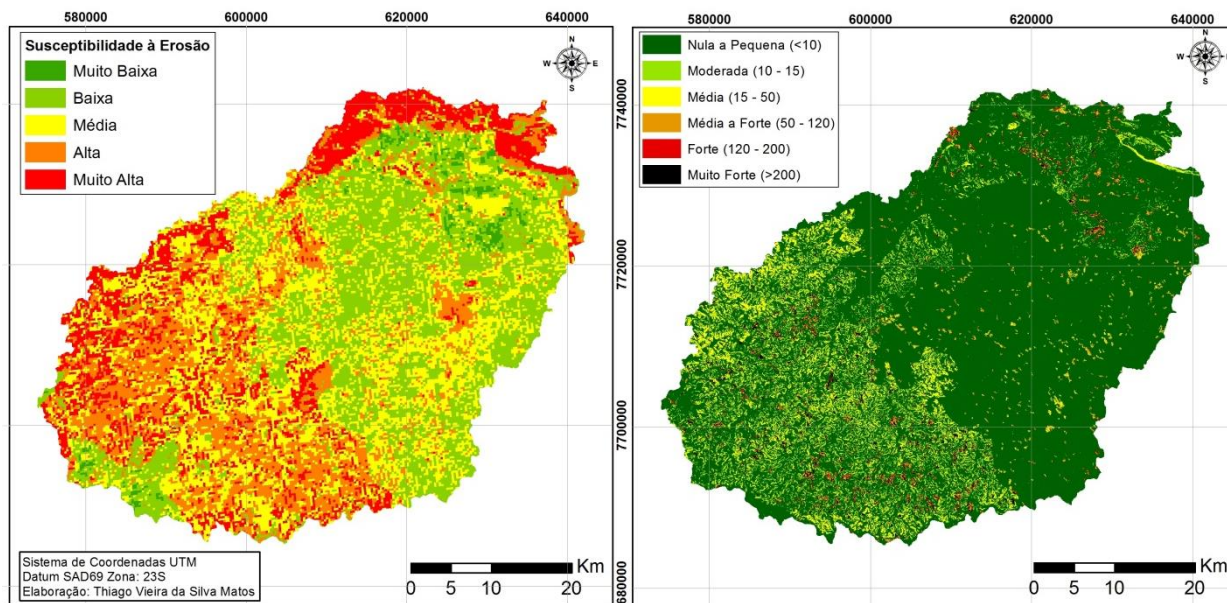


Figura 37: vulnerabilidade à erosão e USLE

Porém, para verificar o grau de compatibilidade entre os resultados da USLE e do ZEE, foi executado um cruzamento pixel-a-pixel das duas bases. Para cruzar foi necessário igualar o número de classe dos resultados. O mapa de vulnerabilidade do ZEE é classificado em cinco classes (Tabela 27). Desta forma, a chave de classificação (Tabela 28) foi reclassificada em cinco classes ajustando-se a chave de Carvalho (1994), Borges (2009) e Lanza (2011).

Tabela 28: **Classes de Potencial erosivo**

Taxa de Perda de solo (ton/ha.ano)	Classes de Interpretação
0 -10	Nula
10 – 15	Moderada
15 - 50	Média
50 - 200	Forte
> 200	Muito forte

Os resultados reafirmaram o antagonismo das metodologias. Como pode ser observado na Tabela 29 e Figura 38, apenas 5,33% da área de estudo apresentam resultados compatíveis, ou seja, que obtiveram classificação semelhante nas metodologias de vulnerabilidade dos solos do ZEE e USLE.

Tabela 29: Matriz de cruzamento comparativo.

ZEE	USLE	%
Muito Baixa – 1	Nula – 1	1.35
Baixa – 2	Moderada – 2	0.67
Média – 3	Média – 3	2.31
Alta – 4	Forte – 4	0.65
Muito Alta - 5	Muito forte - 5	0.34
Total		5.33

Foi possível observar na Figura 38 que as classes mais elevadas, principalmente a classe 3, encontram-se na região de ocorrência de Cambissolos, solo que apresenta maior erodibilidade entre os solos existente na área de estudo.

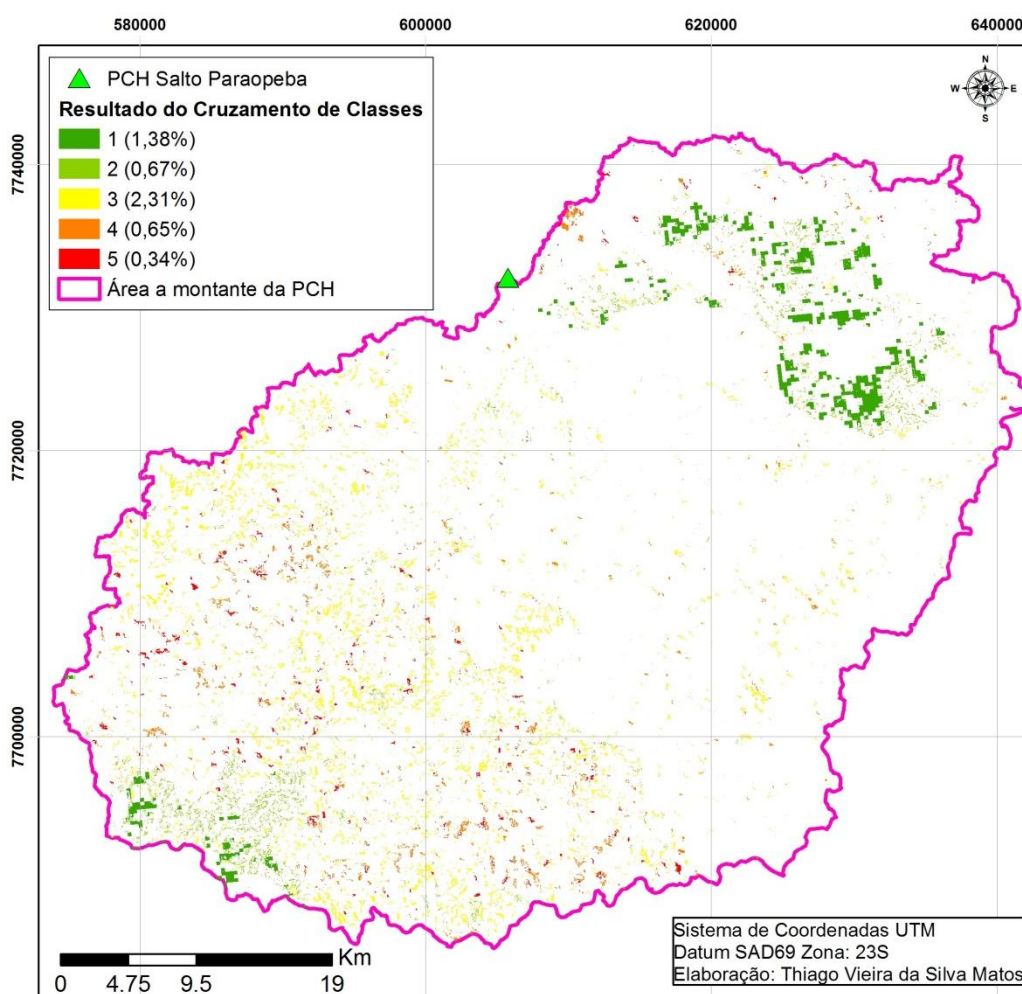


Figura 38: Cruzamento do mapa de vulnerabilidade e USLE.

Desta forma, mesmo com resultados sensivelmente distintos, é notório que alguns fatores têm pesos que influenciam no resultado final. Observando a conformação espacial das metodologias fica evidente que o solo é fator determinante em ambas, pois

na região em que se encontra o Cambissolo é a que apresenta os maiores índices de concordância nas duas metodologias.

Tabela 30: USLE e Vulnerabilidade por Sub-bacia

USLE (%)							
Sub-bacia	Área (Km ²)	nula	moderada	média	média a forte	forte	muito forte
Córr. Forno	2.26	99.65	0.35	-	-	-	-
Maranhão-Pequiri	1351.67	91.81	2.68	2.88	1.43	0.62	0.58
Camapua	1102.34	70.07	12.26	13.35	1.22	1.06	2.05
Rib. Esmeril	8.70	72.00	7.29	4.29	5.77	7.11	3.53
Vale Paraopeba	1.40	99.16	0.27	0.26	0.13	0.06	0.13
Área 1	1.33	89.24	2.56	0.41	2.10	4.41	1.29
Área 2	0.70	99.36	0.64	-	-	-	-
Área 3	0.22	98.80	1.20	-	-	-	-
Área 4	0.35	97.95	2.05	-	-	-	-
Área 5	0.66	98.14	1.86	-	-	-	-
Área 6	0.33	94.46	5.54	-	-	-	-
Área 7	0.30	100.00					
Vulnerabilidade (%)							
Sub-bacia	Área (Km ²)	Muito baixo	Baixo	Média	Alta	Muito Alta	
Córr. Forno	2.26	0.71	35.38	19.83	29.01	15.06	
Maranhão-Pequiri	1351.67	2.25	42.30	31.79	13.52	10.15	
Camapua	1102.34	0.56	12.43	34.19	31.96	20.86	
Rib. Esmeril	8.70	-	4.81	6.05	38.51	50.62	
Vale Paraopeba	1.40	-	3.21	39.41	28.04	29.34	
Área 1	1.33	-	0.42	27.53	16.16	55.89	
Área 2	0.70	-	2.75	37.33	59.91	0.00	
Área 3	0.22	-	0.00	18.54	59.29	22.17	
Área 4	0.35	-	18.67	51.38	26.20	3.75	
Área 5	0.66	-	12.15	40.58	33.40	13.88	
Área 6	0.33	-	0.00	0.70	-	52.57	
Área 7	0.30	-	39.60	21.41	1.01	37.98	

Ao discretizar os resultados nas sub-bacias, Tabela 30, observou-se que enquanto na USLE as sub-bacias que apresentavam a maior concentração de valores entre *moderada*,

média e média-forte eram as sub-bacias Camapuã e ribeirão Esmeril. Na vulnerabilidade quase todas as sub-bacias possuem considerados valores de *média e alta* susceptibilidade. Exemplo da desconexão dos resultados foi observado na Área 7, que nos resultados da USLE toda sua área tem potencial *nulo* já na vulnerabilidade 37,98% de sua área foi determinada como *muito alta*.

Tamanha discrepância dos valores apresentados, principalmente na área 7, deve-se ao peso da classificação da erodibilidade no risco potencial à erosão do ZEE. Nesta mesma área, os fatores exposição do solo ao impacto direto das gotas de chuva e intensidades das chuvas apresentaram valores amenos, indicando que o peso da erodibilidade foi preponderante para a grande diferença.

5.6 Uso de variáveis geomorfológicas em conjunto do potencial erosivo resultante da USLE

A forma do terreno refere-se à combinação de variáveis geomorfológicas oriundas da altimetria, onde a curvatura vertical da vertente determina se ela é convexa/ côncava e a curvatura horizontal, que apresenta sua característica divergente ou convergente dos fluxos. No contexto da pesquisa, foi considerado que a curvatura horizontal, especificamente a divergente, representava a variável mais importante no que tange ao processo de transporte de sedimento.

A curvatura horizontal indica o formato da vertente quando analisada em projeção horizontal. É também definida como uma derivada de segunda ordem, entretanto, não da elevação, e sim das curvas de nível. Em analogia à relação entre curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal pode ser descrita como a variação da orientação de vertentes ao longo de uma determinada distância. Fundamentalmente, a curvatura horizontal se traduz no caráter de divergência ou convergência das linhas de fluxo. (VALERIANO, 2008)

Como mencionado na Metodologia, o recorte desta análise foi a sub-bacia do rio Camapuã. E em seu território foi computado que 39,17% da área da sub-bacia é compostas de vertentes de forma convergente, 14,67% plana e 46,16% de vertentes divergentes. A Figura 39 e a Tabela 31 apresentam que do total das vertentes divergente da sub-bacia 16,39% de sua área estão com potencial acima do tolerável. Logo 8,29%

de toda a sub-bacia Camapuã estão com o potencial acima do tolerável e ainda localizado na feição geomorfológica mais propensa ao transporte do sedimento erodido, vertente divergente.

Tabela 31: Classe de Perde do solo em Vertentes Divergentes

Taxa de Perda de solo (ton/ha.ano)	Classes de Interpretação	%
15 – 50	média	11,93
50 – 120	média a forte	1,15
120 – 200	forte	1,14
> 200	muito forte	2,16
Total		16,39

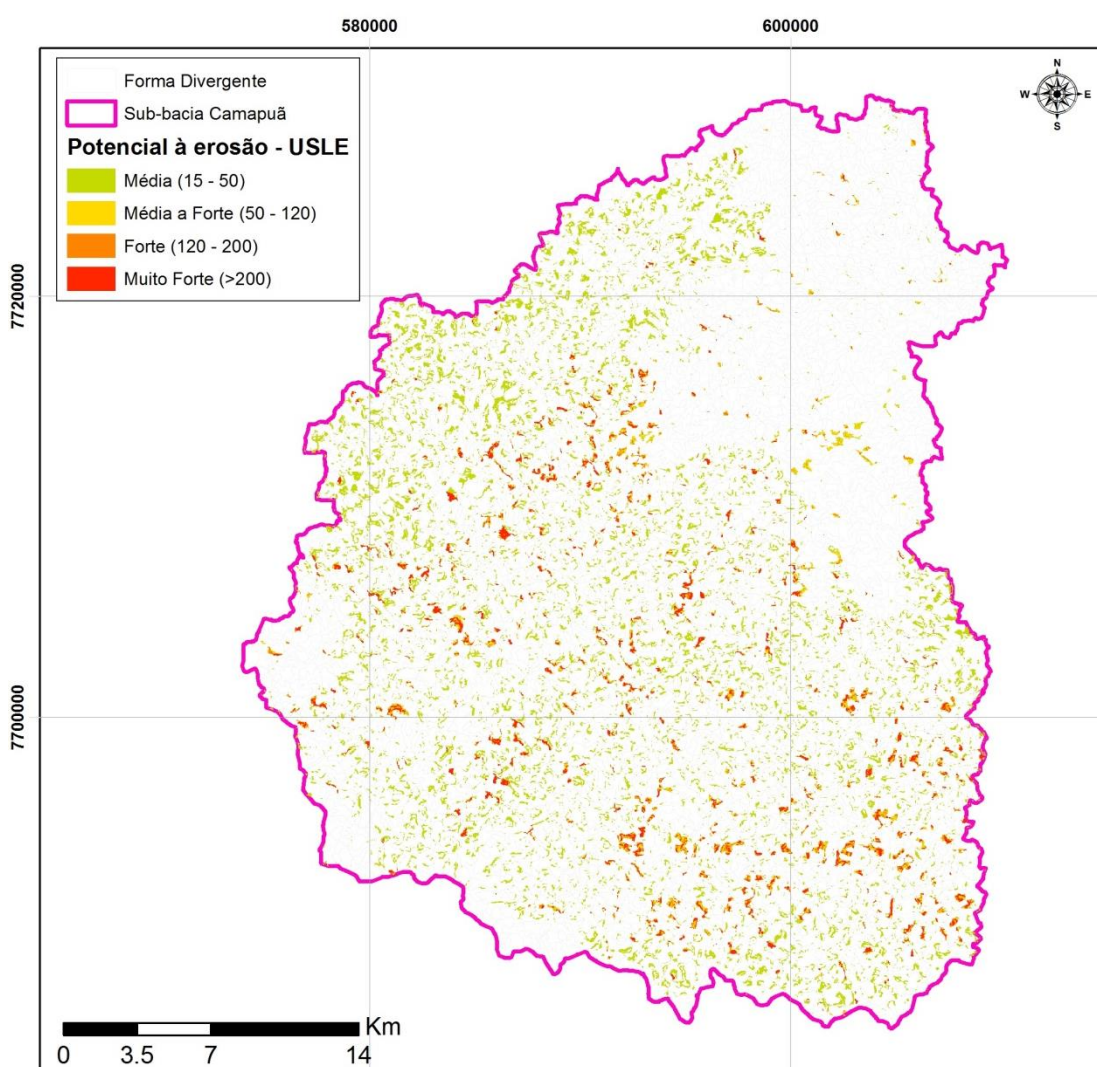


Figura 39: Potencial de perda em Vertentes divergentes

O cruzamento da forma do terreno com os resultados da USLE possibilitou identificar, quantificar e diagnosticar as áreas que demandam de atenção quando a questão é o

potencial de transporte de sedimento. Portanto, foi possível ponderar que a possibilidade de uso conjunto dessas informações mostrou-se muito valiosa.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O único parâmetro capaz de determinar a variação temporal do potencial de perda de solo é o de uso e manejo e práticas conservacionistas (CP). Porém o mapeamento deste fator nos anos de 1984 e 2010 indicou pouca variação no uso do solo, logo determinar uma possível evolução no potencial erosivo não é plausível.

A inserção do programa computacional NetErosividade MG para determinar indiretamente o valor anual da erosividade (R) da chuva, torna esta etapa ágil e simplifica a construção da Equação Universal de Perda de Solo. Uma vez que o cálculo deste fator apresenta-se como um dos momentos mais onerosos do processo, e muitas vezes impossível de ser executado devido à qualidade da informação ou mesmo da sua inexistência.

O resultado da equação indica que os fatores de erodibilidade (K) e de uso e manejo e práticas conservacionistas (CP) são os que exercem maior influência na conformação espacial das áreas vulneráveis à perda de solo por erosão hídrica. Os outros fatores, erosividade (R) e topográfico (LS), produzem efeito menor, especialmente em função da escala da área de estudo. É presumível que em uma escala regional os efeitos da chuva sejam mais notáveis, assim como que em uma escala mais local, o fator topográfico possa ser mais influente.

A determinação do fator K apresenta significativa influência com relação à escala do dado. O mapeamento pedológico utilizado possui escala de 1:600.000, limitando o detalhamento das classes pedológicas e assim influenciando espacialmente o resultado. O fator CP é construído a partir de imagens LANDSAT 5 de resolução de 30 metros. Esta resolução é adequada para a escala do trabalho e permite determinar as classes mais comuns da região. Porém, um mapeamento com imagens de resolução menor permitiria maior diferenciação das categorias que possui comportamentos diferentes em relação ao processo erosivo.

Ainda sobre escala das informações disponíveis. O Fator Topográfico LS apresenta-se sensível às alterações na escala do dado. Os resultados do modelo ASTER apresenta maior concentração na primeira classe em comparação ao SRTM. Porém, ao analisar os resultados em um âmbito geral, os dois MDEs proporcionam resultados próximos, pois

mais de 95% dos resultados estão nas três primeiras classes do fator. Neste sentido, a diferença concreta é observada na amplitude dos resultados. Na metodologia de Bertoni (1959) esta amplitude é de quase 100% entre o modelo de 30 e 90 metros, influenciado principalmente no cálculo do comprimento de rampa. Já no método de Desmet e Goovers (1996), a diferença é exponencial, apresentando mais de 6.000% de variação. T tamanha diferença se dá devido ao conceito acumulado presente nesta metodologia, que faz com que a metodologia aplicada no MDE de 30 metros acumule mais células que no de 90.

Ao contrapor a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) com o Mapa da Vulnerabilidade dos solos à erosão do ZEE-MG, observa-se que os resultados são divergentes. Tendo fatores relativamente semelhantes (chuva, solo, topografia e cobertura do solo), nota-se que o principal ensejo para tal discrepância é a classificação dos fatores relacionados nas metodologias. O fator que compreende o uso e cobertura do solo em ambas as metodologias possuem resoluções espaciais diferentes, mesmo assim, é possível observar que os próprios tem conformação espacial equivalente, sendo a única diferença sua classificação diante do fenômeno erosão.

Outro ponto de destaque é a influência exercida no resultado pelo fator erodibilidade do solo. Oriundas do mesmo mapeamento, este fator têm classificação semelhante nas duas metodologias. Feições pedológicas como os Cambissolos, consideradas de alta erodibilidade na USLE, também é assim classificadas no ZEE. Os Latossolos também possuem classificações semelhantes. A única feição que não é classificada igual em ambas as metodologias é o Neossolos, na USLE considerado de baixa erodibilidade e na ZEE muito alta.

A USLE não contempla de forma aprofundada a variável geomorfológica forma de terreno, portanto avaliar a possibilidade do uso de variáveis geomorfológicas em conjunto dos resultados obtidos na aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) mostrou-se plausível. Obter o panorama de áreas com potencial de perdas acima dos limites toleráveis e localizadas em feições geomorfológicas propensas a dispersão de sedimento é uma ferramenta poderosa na gestão de bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

ACIESP. *Glossário de Ecologia*. São Paulo: Publicação ACIESP, n. 57, 1987. 271p.

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, v. 65, 2005, p. 247-271.

ALBUQUERQUE, E. R. Aplicação de Geotecnologia na Gestão Ambiental do Município de Salinas, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC. 2009.

ALVES, A.; SOUZA, F. J. ; MARQUES, M. Avaliação do potencial à erosão dos solos: uma análise comparativa entre Lógica Fuzzy e o Método USLE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Goiânia, 2005. [Anais] Goiânia, 2005, v.1, p. 2011-2018.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 33, n. 2, 2003, p. 117-124.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, S.; PRUSKI, F. F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F. F. (editor). *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. Viçosa: Editora UFV, p. 74-107, 2009.

ANDERSON, J.R.; HARDY, E.E.; ROACH, J.T.; WITMER, R.E. *A Land Use and Land Cover Classification for use with Remote Sensing Data*. Washington: United States Department of the Interior, 1976. 41p.

ARNESEN, A. S. Análise da vulnerabilidade natural à erosão na Bacia Hidrográfica do Rio Tijucas através de técnicas de geoprocessamento: um subsídio à governança territorial. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009. 96 p.

BAKKER, M. M.; GOVERS, G.; KOSMAS, C.; VANACKER, V.; OOST, V.; ROUNSEVELL, M. Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 105, n. 3, 2005, p. 467-480.

BATALHA, R. M. P. *Expectativa de risco de degradação dos recursos hídricos na bacia do rio Jundiá Mirim*. Campinas, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos estados da Amazônia Legal. Rio de Janeiro: LAGET/UFRJ, 1997. 43p.

BERTOL, I. *et al.* Erodibilidade de um cambissolo húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em lages. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 26, Viçosa, 2002, p. 465-471.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 24, 2000, p. 657-668.

BERTONI, J. O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. *Bragantia*, Campinas, 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 8. ed. São Paulo: Ícone Editora, 2012. 355 p.

BLOISE, G. L. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; REATTO, A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F. *Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da Bacia do Olaria – DF*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 33 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento)

BRADY, N.C. & WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, 13th ed., 2002, 960 p.

BORGES, K. M. R. *Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhanha (MG/BA) por meio da EUPS – Equação Universal de Perda de Solos*. Brasília, 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília.

CAJAZEIRO, J. M. D. Análise da susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de contribuição do ribeirão Arrudas e córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização. Belo Horizonte, 2012. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J.; IR, F.M. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *R. Bras. Agrometeorol.*, v. 5, 1997, p. 89-97.

CAMPBELL, J. B., Introduction to remote sensing. New York: The Guilford Press, 1987. 551 p.

CANTALICE, J. R. B. *et al.* Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco – 1ª aproximação. *Caatinga*, Mossoró, v. 2, n. 22, jun. 2009, p. 75-80.

CARDOSO, L. G. Características Físicas de Bacias Hidrográficas: Alguns Índices. Material de aula da disciplina *Avaliação e Uso de Bacias Hidrográficas* – Curso de Pós-

Graduação em Agronomia, Energia na Agricultura da UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP/FCA), 2012.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000. 95p.

CASTRO, Fernando Soarez de. *Conservacion de Suelos*, Barcelona – Madrid – Segunda Edição, 1965.

CHAVES, H. M. L. Aplicação de modelos na previsão de erosão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 5, 1995, Bauru. [Anais] Bauru: ABGE/DAEE, 1995.

CHAVES, H. M. L. *Estimativa da erosão atual e potencial no vale do São Francisco: relatório final de consultoria*. Brasília: CODEVASF, 1994. 35 p.

CHAVES, H. M. L. Incertezas na predição da erosão com a USLE: impactos e mitigação. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 34, 2010, p. 2021-2029.

CHAVEZ Jr., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, p. 459-479, 1988.

CHEREM, L. F. S. *Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG*. Belo Horizonte, 2008. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

CHRISTOFOLETTI, A. *Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG)*. Rio Claro, 1970. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 186p.

COELHO NETO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 2. ed. Rio de Janeiro: BertrandBrasil, 1995, cap. 3, p. 93-148.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. *Introduzindo hidrologia*. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2008. 149 p.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York: Lewis Publishers, 1999. 136 p.

CORATO, R.M.S.; BOTELHO, R.G.M. A microbacia como unidade espacial de análise em geografia física. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 9, 2001, Recife. Resumos... Recife: UFPE, 2001. 325.pdf

CORRECHEL, V. *Avaliação dos índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do ¹³⁷Cs*. Piracicaba, 2003. Tese (Doutoramento). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

COSTA, A. L. C. *Estudo da vulnerabilidade à erosão com a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo na Alta Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Pepira, utilizando SIG/SPRING*. Rio Claro, 2005. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

COSTA, T. C. C.; FIDALGO, E. C. C.; NAIME, U. J.; GUIMARÃES, S. P.; ZARONI, M. J.; UZEDA, M. C. Vulnerabilidade de sub-bacias hidrográficas por meio da equação universal de perda de solo e da interação de parâmetros morfométricos, topográficos e de uso/cobertura da terra no estado do Rio de Janeiro. *Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n. 1, 2009, p. 93-116.

CREPANI, E. *Esclarecimentos ZEE*. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por <crepani@dsr.inpe.br> em 12 mar. 2015.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S., PALMEIRA, A. F., SILVA, E. F. Zoneamento Ecológico-Econômico. In: FLORENZANO, T. G. (organização) *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p. 285-318.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T; BARBOSA, C. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento EcológicoEconômico e ao Ordenamento Territorial*. São José dos Campos: INPE, 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; Curso de sensoriamento remoto aplicados ao zoneamento ecológico-econômico In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. [*Anais eletrônico*] São Paulo: Image Multimídia, 1996. Seção de Comunicações Técnico-Científica. 1 CD-ROM.

DEL PRETTE, M. E.; MATTEO, K. C. Origens e possibilidades do zoneamento ecológico econômico no Brasil. *Caderno de Referência Subsídio ao Debate*. Brasília, Ministério do Meio Ambiente. 2006.

DENARDIN, J.E. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba: ESALQ, 1990. 81p. Tese de Doutorado.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAAE); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Controle de erosão: bases conceituais e técnicas*. São Paulo: DAAE/IPT, 1989. 92p.

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, 1996, p. 427-433.

EDUARDO N. E. CARVALHO D. F.; MACHADO R. L.; SOARES P.F.C.; ALMEIRA W. S de; Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural. *R. Bras. Ci. Solo*, v 37. 2013

EL-SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W.; ARMSTRONG, C. L. *Soil erosion by water in the tropics*. Honolulu: College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 1982.

EL-SWAIFY, S.A.; DANGLER, E.W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 1976, West Lafayette. Proceedings. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1977. p.105-114.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p

EYKHOFF, P. System Identification-Parameter and State Estimation. New York: Wiley, 1974.

FAO. *Wischmeier and Smith Empirical Soil Loss Model (USLE)*, 1962. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/t1765e/t1765e0e.htm>> Acesso 10 dez. 2013.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O.B.; 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 Perdas de Solos – utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, n. 2, 2006, p. 73-85.

FISTIKOGLU, O.; HARMANCIOOGLU, N. B. Integration of GIS and USLE in assessment of soil erosion. *Water Resources Management*, n. 16, 2003, p. 447-467.

FOSTER, G. R.; MC COOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal Soil Water Conservation*, v. 36, 1981, p. 355-359.

FREITAS, L. F. *et al.* Determinação do potencial de erosão a partir da utilização da EUPS na Bacia do Rio Preto. *Espaço & Geografia*, Brasília, v. 10, n. 2, 2007, p. 431-452.

GOMES, A. R. *Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo em região semi-árida utilizando Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento – Área piloto de Parnamirim*

(PE). São José dos Campos, 2000. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

GÓMEZ, J. D. P. *Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo território Brasileiro*. Piracicaba, 2012.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. [2002]. *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 3. ed., Rio de Janeiro: Bertrand, 2009, p. 17-55.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 2. ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. Cap. 3, p. 93-148.

HIPÓLITO J. R. e VAZ, A. C. *Hidrologia e Recursos Hídricos*, IST Press, Lisboa (2011). 814 p.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soe. Am. Bull.*, v. 56, n. 3, 1945, p.275-370.

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manual técnico de uso da terra*. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 91p.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Software para processamento de informações geo-referenciadas (SPRING 3.5), < www.dpi.inpe.br/spring > 2001

JÜRGENS, C.; FANDER, M. Soil erosion assessment and simulation by means of SGEOS and ancillary digital data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 14, n. 15, 1993, p. 2847-2855.

LANZA, D. S. *Diagnóstico da Erosão Laminar na Alta e Média Bacia do Rio Paraopeba*. Belo Horizonte, 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Análise Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais.

LEINZ, V.; LEONARDOS, O. H. *Glossário geológico*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1977.

LOCH, R.; ROSEWELL, C. Laboratory methods for measurements of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation, *Australian Journal of Soil Research*, n. 30, 1992, p. 233-248.

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

LUIZ, C. H. P. *Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do rio Picacicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço*. Belo Horizonte, 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, UFMG.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; CAROLINO DE SÁ, M. A. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 21, n. 3, 1997, p. 447-456.

MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.S.; AVANZI, J.C.; CURI, N. FONSECA, S. Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em mata atlântica nos tabuleiros costeiros do estado do Espírito Santo, *Scientia Florestalis*, v. 38, n. 87, p. 517-526, 2010.

MATA, Clarisse Lacerda *et al.* Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da equação universal de perda de solos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v. 2, n. 8, 2007, p. 57-71.

MC BRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. *Geoderma*, v. 77, 1997, p. 85- 113.

MCCOOL, D.K., BROWN, L.C., FOSTER, G.R., MUTCHLER, C.K., MEYER, L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation, *Transactions of the ASAE*, n. 30, 1387–1396, 1987.

MEDEIROS, L. C. FERREIRA, N. C. FERREIRA, L. G. (2009) Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Cartografia* n61/02, 2009. p. 138-151

MELÉNDEZ-PASTOR, I.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; GÓMEZ, I.; MATAIX, J.; JORDÁN, M. A simplified fuzzy logic model to evaluate soil vulnerability. 1. Theoretical basis: DEM and Remote Sensing. In: EUROPEAN CONGRESS ON REGIONAL GEOSCIENTIFIC CARTOGRAPHY AND INFORMATION SYSTEMS. EARTH AND WATER, 5th, Barcelona, España, 2006. [Anais] v. I, Barcelona: Institut Cartogràfic de Catalunya & Institut Geològic de Catalunya, 2006, p. 182-184.

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. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:537-545, 2007.

MENEZES, J. B.; ARAÚJO, M. S. B.; GALVÍNCIO, J. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CORRÊA, A. C. B. Índice de Vulnerabilidade à Erosão para uma Bacia na Mesorregião do São Francisco Pernambucano, a partir das Relações entre Morfogênese e Pedogênese. In: Revista Brasileira de Geomorfologia. Ano 8, nº 2, 2007 p.45-56.

MESQUITA, C.; ASSIS, A. Q. S.; SOUZA, R. M. Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado – Morretes/PR. In: Revista de Geografia, nº 2, v. especial VIII SINAGEO. Recife, UFPE – DCG/NAPA Set. 2010 p. 249-264.

METTERNICHT, G. e GONZALEZ, S. FUERO: Foundations of a fuzzy exploratory model for soil erosion hazard prediction. *Environmental Modelling and Software*, v. 20, 2005, p. 715-728.

MIGUEL, P. *Caracterização pedológica, uso da terra e modelagem da perda de solo em áreas de encosta do rebordo do planalto do RS / Pablo Miguel. – Santa Maria. Santa Maria, 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo*

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Secretaria de Recursos Hídricos. *Plano Nacional de Recursos Hídricos: panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil. Volume I. Brasília, 2006.*

MOREIRA, M. C. *et al.* Neterosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, n. 32, 2008, p. 1349-1353.

MOREIRA, M. C.; PRUSKI, F. F.; OLIVEIRA, T. E. C.; PINTO, F. A. C.; SILVA, D. D. Redes neurais artificiais para estimativa mensal da erosividade da chuva no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., Bonito, 2007. [Anais]. Bonito: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2007.

MOTA, L. H. S. O.; VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 39-50, jan./mar. 2011.

NITSCH, M. Peasants in the Amazon: interrelationships between ecosystems and social systems in the use and the conservation of tropical rain forests. In: LIEBEREI, R.; VOSS, K.; BIANCHI, H. (ed.) *Proceedings of the Third SHIFT. Workshop. Manaus, 1998, p. 197-202.*

OLIVEIRA, R.R.S.; WATRIN, O.S.; VALENTE, M.A., S.M.N.; PIMENTEL, G.M. Análise da vulnerabilidade natural dos solos à erosão como subsídio ao planejamento territorial em área da microbacia do igarapé Peripindeua, Nordeste Paraense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 30 abr.-05 maio. 2011, Curitiba. Anais. São José dos Campos, SP: INPE, 2011. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

OLIVEIRA, P. T. S. *et al.* Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. *Revista Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Taubaté, v. 5, n. 2, 29 jul. 2010, p. 217-225.

PAULA, E. M. S.; SOUZA, M. J. N. Lógica Fuzzy com técnica de apoio ao zoneamento ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. Florianópolis, 2007 [*Anais*] Florianópolis, v. 1, 2007, p. 2979-2984.

PERSSON, M.; SIVAKUMAR, B.; BERNDTSSON, R.; JACOBSEN, O.H. & SCHJONNING, P. Predicting the dielectric constant–water content relationship using artificial neural networks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1424- 1429, 2002.

QUARTAROLI, C. F. Carta de vulnerabilidade natural à perda de solo do Estado do Maranhão/Carlos Fernando Quartaroli, Luciana Spinelli de Araujo, Edlene Aparecida Monteiro Garçon. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013.

QUINN, P. F.; BEVEN, K. J.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, v. 5, 1991, p. 59-79.

RENARD, K. G.; LAFLÉN, J. M.; FOSTER, G. R.; MC COOL, D. K. The Revised Universal Soil Loss Equation. In: LAL, R. *Soil erosion research methods 2*. ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994. 340p.

RIBEIRO, L. S.; ALVES, M. G. Quantificação de perda de solo por erosão no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de técnicas de geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., Florianópolis, 21-26 abril 2007. [*Anais*] Florianópolis: INPE, p. 3039-3046.

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 06, p. 628-636, 2007.

ROCHA, G. C da. Aplicação da estimativa espaço-temporal da tolerância à perda de solo no planejamento do uso da terra. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-26072013-091837/>>. Acesso em: 2014-07-27

RODRIGUES, T. L. DEBIASI, T. SOUZA, R. F. de. Avaliação da Adequação dos Produtos Aster Gdem no Auxílio ao Mapeamento Sistemático Brasileiro. **Anais... III SIMGEO**, Recife, jul 2010, p. 001 – 005.

RÖMKENS, M. J. M.; ROTH, C. B.; NELSON, D. W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 41, n. 5, Sept./Oct. 1977, p.954-960.

ROSS, J. L. S. “Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados”. In: Revista do Departamento de Geografia n°8, FFLCH-USP, São Paulo, 1994.

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, S. R. Lógica Fuzzy e Zoneamento Ambiental da Bacia do Arroio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. Goiânia, 16-21 de abr. 2005 [Anais] Goiânia: INPE, 2005, p. 2355-2362.

SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 3, 2012, p. 195-211. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.945>> Acesso em 3 jan. 2015

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. *Geological Society of America Bulletin*, v. 67, n. 5, New Jersey, 1956, p. 597-646. Disponível em <[http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)> Acesso em 3 jan. 2015

SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, L. M. T. (ed.). ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais, 2010. Disponível em <<http://www.zee.mg.gov.br/>> Acesso em 10 fev. 2010.

SILVA, A. M. *et al.* Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, n. 33, set. 2009, p.1811-1820.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena*, n. 57, 2004, p. 251- 259.

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. *Geociências – Unesp*, São Paulo, v. 24, n. 1, 2005, p. 33-41.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos: RIMA, 2003. 138p.

SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento para análise Ambiental. Rio de Janeiro: BERTRAND BRASIL, 2001.

SILVA, M. L. N. *et al.* Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 35, n. 6, jun. 2000, p. 1207-1220.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. *Pesq. Agropec. Bras.*, n. 34, 1999, p. 2287-2298.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. *Espaço e Tempo*, GEOUSP, n. 15, 2004, p. 39-49.

STEIN, D. P.; DONZELI, A. F.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na bacia do Peixe Paranapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., São Paulo, 1987. [Anais] São Paulo: ABGE/DAEE, 1987, p. 105-136.

SUAREZ DE CASTRO, F. *Conservación de los suelos*. Costa Rica: IICA, 1980. 315p.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, v. 33, 1997, p. 309-319.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores de EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Jirau, *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 57/03, 2005, p. 235-244.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. RUSLE for mining, construction and reclamation lands, *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, p. 462-467.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: FIBGE/SUPREN, 1977. 91p.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais* [Belo Horizonte], 2010.

VALE, V. L, FREITAS, S, P; MARTINEZ, C, B; COSTA, M, E, F. Aplicação Das equações de equilíbrio morfológico de julien ao trecho Fluvial do reservatório da PCH Salto Paraopeba. In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20, Bento Gonçalves, 2013. [Anais] ABRH, Bento Gonçalves, 2013.

VALERIANO, M. M. *Banco de dados geomorfológicos do Brasil*. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/>>. Acesso em 2 de out. 2008.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Goiânia, v. 4, n. 1, 2003, p. 17-29.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, v. 2, 1981, p. 184-194.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society American Proceedings*, v. 33, 1969, p. 131-137.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: *USDA*, 1978. 58 p. (Agriculture Handbook, 537)

WU, S.; LI, J.; HUANG, G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. *Environment Modeling Assessment*, n. 10, 2005, p. 33-42.

APÊNDICES

Apêndice A

Susceptibilidade à erosão	Intensidade das chuvas	Exposição do solo	Risco de erosão
Muito baixa	Muito baixa	Baixa	Muito baixo
Muito baixa	Muito baixa	Média	Muito baixo
Muito baixa	Muito baixa	Alta	Médio
Muito baixa	Baixa	Baixa	Muito baixo
Muito baixa	Baixa	Média	Baixo
Muito baixa	Baixa	Alta	Médio
Muito baixa	Média	Baixa	Baixo
Muito baixa	Média	Média	Médio
Muito baixa	Média	Alta	Médio
Muito baixa	Alta	Baixa	Baixo
Muito baixa	Alta	Média	Alto
Muito baixa	Alta	Alta	Alto
Muito baixa	Muito alta	Baixa	Alto
Muito baixa	Muito alta	Média	Alto
Muito baixa	Muito alta	Alta	Alto
Baixa	Muito baixa	Baixa	Baixo
Baixa	Muito baixa	Média	Médio
Baixa	Muito baixa	Alta	Médio
Baixa	Baixa	Baixa	Baixo
Baixa	Baixa	Média	Médio

Susceptibilidade à erosão	Intensidade das chuvas	Exposição do solo	Risco de erosão
Baixa	Baixa	Alta	Médio
Baixa	Média	Baixa	Médio
Baixa	Média	Média	Médio
Baixa	Média	Alta	Alto
Baixa	Alta	Baixa	Médio
Baixa	Alta	Média	Alto
Baixa	Alta	Alta	Alto
Baixa	Muito alta	Baixa	Alto
Baixa	Muito alta	Média	Alto
Baixa	Muito alta	Alta	Muito alto
Média	Muito baixa	Baixa	Baixo
Média	Muito baixa	Média	Médio
Média	Muito baixa	Alta	Médio
Média	Baixa	Baixa	Baixo
Média	Baixa	Média	Médio
Média	Baixa	Alta	Médio
Média	Média	Baixa	Médio
Média	Média	Média	Médio
Média	Média	Alta	Alto
Média	Alta	Baixa	Médio
Média	Alta	Média	Alto
Média	Alta	Alta	Alto
Média	Muito alta	Baixa	Médio
Média	Muito alta	Média	Alto
Média	Muito alta	Alta	Muito alto
Alta	Muito baixa	Baixa	Baixo
Alta	Muito baixa	Média	Médio
Alta	Muito baixa	Alta	Alto
Alta	Baixa	Baixa	Baixo
Alta	Baixa	Média	Alto
Alta	Baixa	Alta	Alto
Alta	Média	Baixa	Médio
Alta	Média	Média	Alto
Alta	Média	Alta	Muito alto
Alta	Alta	Baixa	Alto
Alta	Alta	Média	Muito alto
Alta	Alta	Alta	Muito alto
Alta	Muito alta	Baixa	Muito alto
Alta	Muito alta	Média	Muito alto
Alta	Muito alta	Alta	Muito alto
Muito alta	Muito baixa	Baixa	Muito alto
Muito alta	Muito baixa	Média	Muito alto
Muito alta	Muito baixa	Alta	Muito alto
Muito alta	Baixa	Baixa	Muito alto
Muito alta	Baixa	Média	Muito alto
Muito alta	Baixa	Alta	Muito alto
Muito alta	Média	Baixa	Muito alto
Muito alta	Média	Média	Muito alto
Muito alta	Média	Alta	Muito alto
Muito alta	Alta	Baixa	Muito alto
Muito alta	Alta	Média	Muito alto
Muito alta	Alta	Alta	Muito alto
Muito alta	Muito alta	Baixa	Muito alto
Muito alta	Muito alta	Média	Muito alto
Muito alta	Muito alta	Alta	Muito alto
Muito alta	Qualquer	Muito alta	Muito alto