

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Departamento de Geografia**

**Daniel Santana Lanza**

**DIAGNÓSTICO DA EROSÃO LAMINAR NA  
ALTA E MÉDIA BACIA DO RIO PARAÓPEBA**

**Minas Gerais – Brasil  
Maio – 2011**

**Daniel Santana Lanza**

# **DIAGNÓSTICO DA EROSÃO LAMINAR NA ALTA E MÉDIA BACIA DO RIO PARAÓPEBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Philippe Maillard

**Belo Horizonte  
Departamento de Geografia da UFMG  
2011**

L297d Lanza, Daniel Santana.  
2011 Diagnóstico da erosão laminar na alta e média Bacia do Rio Paraopeba [manuscrito] / Daniel Santana Lanza. – 2011.  
xvii, 133 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2011.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Orientador: Philippe Maillard.

Bibliografia: f. 116-133.

Inclui anexos.

1. Solos – Erosão – Paraopeba, Rio (MG) – Teses. 2. Solo – Uso – Paraopeba, Rio (MG) – Teses. 3. Mapeamento da cobertura do solo – Teses. 4. Sistemas de informação geográfica – Teses. 5. Sensoriamento remoto – Teses. I. Maillard, Philippe. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.459(815.1):528.8

Dissertação defendida e aprovada, em 13 de maio de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



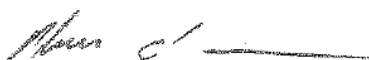
---

Prof. Dr. Philippe Maillard



---

Profa. Dra. Cristiane Valéria de Oliveira



---

Prof. Dr. Plínio da Costa Temba

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço, especialmente,*

*Aos meus pais, Cláudio e Marilourdes, que são o alicerce da minha educação, e sempre incentivaram os estudos. Ao meu irmão Cláudio, pela amizade e companhia. Aos meus avós paternos, Gilda (in memoriam) e Pedro (in memoriam), e maternos, Antônio (antigo pescador que conhece bem os tempos de fartura da bacia do Paraopeba) e Lourdes, pela herança cultural e moral transmitida. Aos tios (as) e primos (as) - são vários (as) – por tantos motivos que se eu fosse dizer aqui, não caberia em somente uma página;*

*Aos colegas, professores e funcionários do Instituto de Geociências da UFMG, onde fiz a graduação e o mestrado, e obtive muitos ensinamentos;*

*Ao meu orientador Philippe Maillard, pela amizade e convivência produtiva;*

*Aos professores (as) Cristiane Valéria de Oliveira, Plínio da Costa Temba e Francisco Barbosa, que deram contribuições valiosas para o desenvolvimento da pesquisa e aperfeiçoamento do texto.*

*À Associação de Desenvolvimento Ambiental - ADESA, especialmente ao Gustavo, Sílvio, Gabrielle e Aline;*

*Ao Dr. Lairson Couto, por estar sempre disponível para ajudar e ter orientado caminhos na minha vida profissional;*

*Ao Consórcio Intermunicipal da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba - CIBAPAR, onde aprendi muito sobre a bacia do rio Paraopeba e fiz muitas amizades; especialmente ao Mauro da Costa Val, por sempre confiar no meu trabalho;*

*Aos amigos da banda BAHAMUT, Antônio, Lourenço e Wilson. Viva La Musica!;*

*Ao amigo Aldo, pelo suporte nos trabalhos de campo;*

*Á Gisele, pelo carinho e conforto;*

*À todos, meus sinceros agradecimentos!*

*É preciso amar a fonte  
 pra se ter amor ao rio...  
 é preciso amar a fonte  
 pra se ter amor ao rio...  
 pra chegar no São Francisco  
 é preciso voltar...  
 pra chegar no São Francisco  
 é preciso voltar...*

*...o São Francisco  
 como exemplo do que digo  
 é o rio já maduro dos olhos d'água  
 de Minas Gerais...  
 por isso mesmo quem cuida  
 de um ribeirão  
 está cuidando de um grande rio da nação...*

*...volto na mina  
 no brejo que ninguém quer  
 no arroio, no rego d'água  
 na bica, no ribeirão  
 pois cada gota que brota em qualquer grotão  
 já traz consigo o nome do rio da imensidão...*

*(A fonte e o rio)*

*O Espírito de Deus  
 paira sobre as águas  
 sua mão lhe move o pensamento  
 tira do espelho do mar  
 a imagem múltipla de si  
 e brotam peixes, brotam plantas  
 parecem não ter fim  
 são as matrizes, as primeiras  
 almas do novo mundo  
 saído das águas...*

*para o bicho: planta  
 para a planta: terra  
 para a terra: chuva doce da nuvem  
 e Deus segue erguendo do pó  
 esse homem: carne, sangue e som  
 que doravante nascerá  
 das águas  
 do ventre de sua mãe  
 sede de rio  
 fome de vastidão  
 corpo de estrelas  
 lágrimas de mar...*

*(Gênese)*

## RESUMO

Este trabalho apresenta um mapeamento e avaliação do potencial à erosão laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba através da modelagem cartográfica. A abordagem metodológica utilizada é a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), um modelo empírico desenvolvido a partir de dados de perdas de solo e água. Os principais fatores do meio físico e antrópico intervenientes no processo de erosão laminar estão contidos na sua formulação. A aplicação foi feita utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os fatores do meio físico foram multiplicados para a obtenção do Potencial Natural à Erosão (PNE), que significa a vulnerabilidade natural à erosão laminar, desconsiderando qualquer tipo de cobertura vegetal ou antropismo. O Potencial Atual à Erosão (Ea) foi obtido após a inclusão da camada do Uso e Cobertura do Solo (UCS) no modelo. O mapa de UCS foi gerado a partir da classificação de imagens do sensor ASTER e da interpretação visual de imagens de alta resolução. Os resultados obtidos indicam que mais de 60% da área de estudo possui um PNE de forte a muito forte. Com relação ao Ea, mais de 54% da bacia possui perdas de solo acima do limite médio de tolerância para solos com ocorrência no Brasil. A área de estudo possui 5.018 km<sup>2</sup> e faz parte da bacia do rio Paraopeba, localizada no Alto São Francisco. É caracterizada por ter um predomínio de processos morfogenéticos e por apresentar grande quantidade de feições erosivas. A identificação e análise das áreas de risco à erosão acelerada, realizadas por meio deste estudo, fornecem subsídios para medidas de conservação do solo e da água nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco.

**Palavras-chave:** erosão laminar, equação universal de perdas de solo, sistemas de informação geográfica, uso e cobertura do solo, sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

This study presents the assessment and mapping of sheet erosion risk in the upper-middle Paraopeba watershed through cartographic modeling. The methodological approach is based on the universal soil loss equation (USLE), an empirical model developed from soil and water loss data. The main physical and anthropic factors involved in the process of sheet erosion are contained in its formulation. A geographic information system (GIS) was used for its implementation. The physical factors are multiplied to obtain the natural erosion potential (PNE), which is the erosion vulnerability disregarding any vegetation cover or anthropogenic interference. The actual erosion potential (Ea) was obtained through the inclusion of the land use and land cover (LULC) layer in the model. The LULC map was generated based on the classification of ASTER imagery and visual interpretation of high resolution images. Results indicate that over 60% of the study area has strong to very strong PNE. With respect to Ea, more than 54% of the basin suffers soil losses above the average limit of tolerance for soils in Brazil. The study area is 5018 km<sup>2</sup> and is part of the Paraopeba river basin, located in the upper São Francisco characterized by a predominance of morphogenetic processes and presents a large amount of erosion features. The identification and analysis of accelerated erosion areas can be used for support soil and water conservation in the Paraopeba São Francisco basins.

**Keywords:** sheet erosion, universal soil loss equation, geographic information systems, land use land cover, remote sensing.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</b>	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>06</b>
2.1. Erosão dos solos: conceitos e principais fatores intervenientes na erosão laminar .....	06
2.2. Equação Universal de Perdas de Solo e Sistemas de Informação Geográfica	13
2.3. Sensoriamento Remoto e Classificação de Uso e Cobertura do Solo .....	22
<b>3. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>29</b>
3.1. Localização e aspectos fisiográficos gerais .....	29
3.2. Clima .....	32
3.3. Geologia e Geomorfologia .....	35
3.4. Pedologia .....	41
3.5. Vegetação .....	45
<b>4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>47</b>
4.1. Dados pluviométricos e fator de erosividade (R) .....	49
4.2. Mapa de solos e fator de erodibilidade (K) .....	52
4.3. Modelo Digital de Elevação e fator topográfico (LS) .....	53
4.4. Classificação de Uso e Cobertura do Solo e fator uso e manejo (CP) .....	56
4.5. Modelagem do potencial à erosão através da EUPS e de um SIG .....	61
4.6. Discretização em sub-bacias .....	62
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
5.1. Uso e Cobertura do Solo .....	65
5.2. Potencial Natural à Erosão (PNE) .....	75
5.3. Potencial Atual à Erosão (Ea) .....	95
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do impacto da chuva no solo ( <i>splash</i> ).....	7
Figura 2: Curvatura horizontal e vertical das vertentes.....	10
Figura 3: Comportamento do escoamento superficial e da infiltração em curvaturas verticais .....	10
Figura 4: Principais funções da vegetação no controle do processo erosivo.....	11
Figura 5: Erosividade da chuva para o estado de Minas Gerais .....	17
Figura 6: Representação do (a) fluxo único e retilíneo e do (b) fluxo acumulado da área de contribuição.....	19
Figura 7: Representação em Modelo Digital de Elevação do (a) fluxo único e (b) fluxo considerando a área de contribuição .....	19
Figura 8: Gráfico de reflectância dos principais objetos da superfície terrestre .....	23
Figura 9: Comportamento espectral da folha e do solo .....	24
Figura 10: Localização geral da área de estudo .....	29
Figura 11: Mapa hipsométrico .....	30
Figura 12: Ordenamento da drenagem conforme classificação de Strahler.....	31
Figura 13: Rede de drenagem com principais rios e ribeirões .....	32
Figura 14: Temperatura e precipitação média anual.....	34
Figura 15: Unidades litoestratigráficas .....	35
Figura 16: Mapa de declividade .....	37
Figura 17: Mapa das macrounidades de relevo.....	38
Figura 18: Mapa de solos .....	43
Figura 19: Fluxograma dos procedimentos metodológicos .....	48
Figura 20: Localização das estações pluviométricas .....	50
Figura 21: Representação do comportamento dos algoritmos do fluxo único ( <i>single flow</i> ) e do fluxo múltiplo ( <i>multiple flow</i> ).....	55
Figura 22: Comprimento de onda das bandas dos sensores LANDSAT ETM e ASTER.....	57
Figura 23: Esquema do efeito paralaxe em uma lente de uma câmara aerotransportada.....	58
Figura 24: Exemplo da classe cultura permanente interpretada visualmente em (a) imagens ASTER e com o apoio de (b) imagens de alta resolução.....	61

<b>Figura 25: Discretização das unidades de análise por sub-bacias .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 26: Mapa de Uso e Cobertura do Solo.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 27: Gráfico de distribuição das classes de UCS.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 28: Imagens ASTER de Áreas urbanas de (a) alta densidade na sub-bacia Maranhão (Congonhas) e (b) média densidade na sub-bacia Casa Branca .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 29: Foto de área industrial na (a) sub-bacia Maranhão e (b) representação da mesma indústria na cena ASTER.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 30: (a) Três condições de pastagem distintas na sub-bacia Manso e (b) pastos ralos e sujos na sub-bacia Barra .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 31: Pomar de citros (laranja) na (a) sub-bacia Cordeiros e (b) no vale do Médio Paraopeba.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 32: Lavoura irrigada de hortaliças nas sub-bacias (a) Manso e (b) Marinhos</b>	<b>71</b>
<b>Figura 33: Cultivo de eucalipto nas sub-bacias (a) Cordeiros e (b) Paivas.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 34: Vegetação arbórea em (a) Capão de Mata próximo as nascentes no vale do Alto Paraopeba e (b) ao fundo na Serra do Camapuã.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 35: Vegetação Campestre sobre a (a) Serra de Ouro Branco e (b) Serra da Moeda .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 36: Imagens ASTER de áreas de mineração nas sub-bacias (a) Maranhão e (b) Casa Branca .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 37: Rio Paraopeba (a) próximo ao Fecho do Funil e (b) em Jeceaba na confluência com o rio Camapuã.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 38: Represa Soledade (a) vista da Serra de Ouro Branco e (b) representada na imagem ASTER.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 39: Mapa da erosividade .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 40: Gráfico da erosividade mensal obtida através do índice de erosividade (EI) .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 41: Mapa da erosividade por sub-bacia .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 42: Gráfico da erodibilidade das unidades de mapeamento de solo .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 43: Mapa da erodibilidade dos solos .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 44: Mapa de erodibilidade por sub-bacia .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 45: Distribuição dos valores do fator topográfico.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 46: Mapa do fator topográfico .....</b>	<b>86</b>

<b>Figura 47: Serra da Moeda (ao fundo) nas proximidades das sub-bacias Piedade e Marinhos e (b) detalhe de escarpa nas cabeceiras da sub-bacia Marinhos.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 48: Mapa de LS por sub-bacia.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 49: (a) Vertentes com altas declividades na Serra Azul e (b) nas sub-bacias Contendas e Barra.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 50: (a) Escarpas sobre quartzitos na Serra de Ouro Fino e (b) vertentes com alta declividade na Serra dos Três Irmãos.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 51: Representação gráfica do Potencial Natural à Erosão em classes de interpretação.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 52: Mapa do Potencial Natural à Erosão .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 53: Mapa do PNE por sub-bacia.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 54: Mapa do fator CP .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 55: Exemplo de serrapilheira formada a partir de resíduos vegetais em uma Mata Secundária na sub-bacia do ribeirão Piedade .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 56: Sistemas de manejo de eucalipto (a) plantado no sentido do declive na sub-bacia Camapuã com e (b) queima de restos culturais no leito do Alto Paraopeba. ....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 57: Pastagem na sub-bacia do rio Camapuã apresentando (a) superpastejo e degradação através de sulcos erosivos e (b) com cobertura total de gramíneas e vegetação preservada em topo de morro.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 58: Pomares de mexerica apresentando (a) cobertura quase total e (b) cobertura parcial de gramíneas entre as plantas na sub-bacia do ribeirão Cordeiros.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 59: Foto de aração do solo por mecanização nas sub-bacias (a) Manso e (b) Camapuã .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 60: O preparo primário deixa a superfície do solo fragmentada e mais exposta à ação direta da chuva. Foto nas sub-bacias do (a) Camapuã e (b) Macaúbas..</b>	<b>102</b>
<b>Figura 61: Mapa de CP por sub-bacia .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 62: Mapa de Potencial Atual à Erosão (Ea).....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 63: Foto de área degradada apresentando focos de erosão laminar e linear na sub-bacia do rio Camapuã.....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 64: Áreas rurais degradadas evidenciando focos de erosão laminar acelerada nas colinas do Alto Paraopeba .....</b>	<b>108</b>

- Figura 65: Mapa do Potencial Atual à Erosão (Ea) por sub-bacia..... 110**
- Figura 66: Paisagem típica da sub-bacia do ribeirão Contendas apresentando pastagem preservada com cobertura total de gramíneas e vegetação em topo de morro..... 110**
- Figura 67: Sub-bacia do ribeirão da Barra apresentando vegetação preservada ao lado de áreas com cobertura parcial do terreno evidenciado focos de erosão laminar acelerada..... 111**
- Figura 68: Duas feições erosivas do tipo voçoroca na sub-bacias do rio Macaúbas . 112**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Fator CP da EUPS para alguns tipos de cobertura do solo.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 2: Chave de Classificação de Uso e Cobertura do Solo .....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 3: Chave de Classificação elaborada por IBGE (2006) .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 4: Balanço Hídrico no alto e médio Paraopeba.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 5: Balanço Hídrico mensal na área de estudo .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 6: Propensão à erosão acelerada nos Planaltos Dissecados .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 7: Propensão à erosão acelerada no Quadrilátero Ferrífero .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 8: Detalhamento das classes de solos.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 9: Série histórica dos dados pluviométricos. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 10: Erodibilidade das classes de solos de ocorrência na área de estudo .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 11: Comprimento de onda e resolução espacial das bandas do sensor ASTER .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 12: Cenas ASTER utilizadas para a construção do mosaico .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 13: Chave de classificação de Uso e Cobertura do Solo .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabela 14: Discretização das unidades de análise por região da bacia, margem do rio, sub-bacias e municípios .....</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 15: Matriz de confusão da classificação supervisionada .....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 16: Distribuição das classes de UCS.....</b>	<b>68</b>
<b>Tabela 17: Classes de Interpretação de erosividade da chuva .....</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 18: Valores médios mensais e anual de precipitação e erosividade.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 19: Erosividade por sub-bacia .....</b>	<b>79</b>
<b>Tabela 20: Erodibilidade das unidades de mapeamento de solos .....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 21: Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação .....</b>	<b>82</b>
<b>Tabela 22: Erodibilidade por sub-bacia .....</b>	<b>84</b>
<b>Tabela 23: Classes de distribuição do fator topográfico .....</b>	<b>85</b>
<b>Tabela 24: Fator topográfico por sub-bacia .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 25: Distribuição do Potencial Natural à Erosão em classes de interpretação .</b>	<b>91</b>
<b>Tabela 26: Potencial Natural à Erosão por sub-bacia .....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 27: Distribuição dos valores de CP.....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 28: Fator CP por sub-bacia.....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 29: Distribuição de classes de Potencial Atual à Erosão (Ea).....</b>	<b>105</b>

<b>Tabela 30: Potencial Atual à Erosão (Ea) por sub-bacia.....</b>	<b>109</b>
--	------------

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ANA** – Agência Nacional de Águas

**ASTER** – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

**CETEC** – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

**CIBAPAR** – Consórcio Intermunicipal da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba

**COMIG** – Companhia Mineradora de Minas Gerais

**CP** – Fator Uso e Manejo e Práticas Conservacionistas

**DAAE** – Departamento de Águas e Energia Elétrica

**Ea** – Potencial Atual à Erosão

**Ec** – Energia Cinética da Chuva

**EI<sub>30</sub>** – Índice de Erosão da Chuva

**EMATER** – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**EUPS** – Equação Universal de Perdas de Solo

**GPS** – Global Positioning System

**h** – hora

**ha** - hectare

**HIDROWEB** – Sistema de Informações Hidrológicas

**I<sub>30</sub>** – Intensidade Máxima de Chuva em 30 minutos

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IBRAM** – Instituto Brasileiro de Mineração



**IGA** – Instituto de Geociências Aplicadas

**INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**IPT** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**Km<sup>2</sup>** – Quilômetro Quadrado

**L** – Fator Comprimento de Rampa

**LCI** – Land Cover Institute

**LS** – Fator Topográfico

**mm** – Milímetro

**MAXVER** – Máxima Verossimilhança

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**Mg** – Megagrama ou Tonelada

**MJ** – Megajoule

**p** – Precipitação Média Mensal

**P** – Precipitação Média Anual

**PNE** – Potencial Natural à Erosão

**PDI** – Processamento Digital de Imagens

**R** – Fator de Erosividade

**Rc** – Índice de Fournier

**REM** – Radiação Eletromagnética

**RMBH** – Região Metropolitana de Belo Horizonte

**RUSLE** – Equação Universal de Perdas de Solo Revisada

**S** – Fator de Declividade

**SIG** – Sistemas de Informação Geográfica

**SRTM** – Shuttle Radar Topographic Mission

**UCS** – Uso e Cobertura do Solo

**USGS** – United States Geological Service

**UTM** – Universal Transversa de Mercator

**VS** – Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil

**K** – Fator de Erodibilidade

$\hat{K}$  – Índice Kappa

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O crescimento da população nos centros urbanos está promovendo o aumento na demanda por alimentos e a ocupação de novas áreas para a agricultura. Nesse contexto, as pesquisas fundamentadas na análise da influência do Uso e Cobertura do Solo (UCS) sobre o processo erosivo são de primeira necessidade. Isso porque a cobertura superficial atua como camada protetora e os sistemas de manejo modificam as características físicas e químicas do solo, diminuindo ou aumentando a sua vulnerabilidade à erosão. A interligação das informações do UCS com as características naturais da paisagem é essencial e indispensável, devido à sua influência na dinâmica do processo erosivo (CHRISTOFOLETTI, 1987; MOREIRA, 1992; MORGAN, 2006).

A erosão é um fenômeno complexo, que tem sido objeto de interesse de várias áreas das ciências ambientais. Entre as diversas abordagens de análise, está a elaboração da cartografia de áreas de risco, as observações de campo e atividades de experimentação, a incidência espacial de focos de feições erosivas e também a estimativa das taxas de perda de solos. A escala de análise é um fator determinante, que caracteriza o tipo de abordagem e o grau de detalhe dos estudos.

Por outro lado, é fundamental diferenciar as categorias de erosão laminar (provocada pelo escoamento laminar ou difuso) e erosão linear (provocada por escoamento de fluxo concentrado). Essa diferenciação é necessária por causa dos diversos mecanismos e condicionantes de cada um dos processos (SALOMÃO, 2009; BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999). A erosão laminar resulta na remoção progressiva e uniforme das camadas superficiais do solo. Geralmente não é perceptível e exuberante como a erosão linear, mas pode ser a principal responsável pelas perdas de solos em determinados locais. É essa categoria de erosão que será tratada neste estudo.

A erosão laminar é um processo natural que atua sobre as vertentes modelando o relevo. Nesse caso, a manifestação é não-aparente. O equilíbrio é rompido, principalmente a partir da utilização das terras para atividades agropastoris. A intensidade de ocorrência do processo é comandada por fatores relacionados às condições naturais do terreno e são

deflagradas pelas formas de utilização das terras. Dependendo do uso do solo e das pressões exercidas pelo homem pode ocorrer a erosão acelerada, comparada com as taxas naturais de erosão (EL-SWAIFY *et al.*, 1982). O processo acelerado pode levar ao empobrecimento da qualidade e da fertilidade natural dos solos (LAL, 1985; PINHEIRO e PONS, 2008), alterar a qualidade da água (NOVOTNY e OLEM, 1994; JULIEN, 1998), e contribuir para o assoreamento de rios e reservatórios (CARVALHO *et al.*, 2000; WARD e TRIMBLE, 2003).

A erosão acelerada e o transporte de sedimentos na rede de drenagem são alguns dos principais problemas ambientais da área de estudo, que corresponde à alta e média bacia do rio Paraopeba, localizada na região central de Minas Gerais, próxima ao terceiro maior centro urbano do país, que é a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

A ocupação da bacia do rio Paraopeba iniciou-se nas últimas décadas do século XVII, incentivada, principalmente pela atividade minerária. A descoberta de ouro no leito do rio motivou a ocupação do alto e médio trecho da bacia. A utilização das águas para o transporte de mercadorias também favoreceu a instalação de fazendas com atividades agropecuárias. Com a decadência da mineração, a agropecuária se tornou uma das atividades mais importantes. A partir da segunda metade do século XX ocorreu o desenvolvimento acelerado de alguns municípios que vieram a se tornar pólos microrregionais, como Conselheiro Lafaiete e Betim (CIBAPAR, 2010).

Um total de 30 municípios está inserido ou parcialmente inserido, sendo que 24 possuem a sede dentro da bacia de estudo, que corresponde à área à montante do Fecho do Funil. A atividade minerária possui forte presença nas Serras do Quadrilátero Ferrífero, e indústrias de grande porte estão localizadas na sub-bacia do rio Maranhão, em Ouro Branco e Conselheiro Lafaiete; e mais recentemente em Jeceaba, na sub-bacia do rio Camapuã. A agropecuária é uma prática que ocorre em toda a bacia com a predominância da pecuária e da produção de hortaliças, milho, laranja, mexerica, limão, cana-de-açúcar, mandioca, feijão, arroz, café e batata (SCHVARTZMAN, 2000; TÔSTO *et al.*, 2000; ANA, 2003).

O processo de erosão acelerada e de perdas de solo nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco foram temas de trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas. Oliveira *et al.* (1978) identificaram e mapearam as áreas de maior propensão à erosão acelerada nas

cabeceiras dos rios Paraopeba e das Velhas, destacando a ocorrência de focos de erosão acelerada nas cabeceiras das sub-bacias dos rios: Brumado, Maranhão e nascentes do rio Paraopeba. Na década de 70 os autores já chamaram a atenção para a necessidade de um programa de recuperação ambiental na região. Chaves (1994) aplicou a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) para a bacia do rio São Francisco na escala do milionésimo e identificou altas taxas de perdas de solo situadas na bacia do rio Paraopeba. CETEC e IGA (1996) mapearam os focos de erosão acelerada na bacia do rio Paraopeba e constataram que a erosão laminar é preponderante, correspondendo a 48% do total dos focos de erosão acelerada. Lima *et al.* (2001) correlacionaram a vazão média com a concentração de sólidos em suspensão para avaliar a carga de sedimentos na bacia do rio São Francisco. O rio Paraopeba, apesar de ter vazão mais baixa em comparação aos outros tributários, é o 4º em fluxo de sedimentos em suspensão, com 11% do total na bacia do rio São Francisco. No que se refere à concentração de sólidos em suspensão, a estação de Belo Vale foi a que apresentou os maiores valores de toda a bacia do rio São Francisco, com  $1.094 \text{ mg L}^{-1}$ . Os autores concluem que o rio Paraopeba é um dos principais responsáveis pelo assoreamento do reservatório de Três Marias.

É evidente que os estudos mencionados apresentam diferentes níveis de detalhe e tipos de abordagem metodológica. Porém, todos indicam que a alta e média bacia do rio Paraopeba se destaca pela intensidade dos processos erosivos e por fornecer altas taxas de sedimentos na bacia do rio São Francisco. A suscetibilidade natural dos solos, o quadro físico regional e as atividades antrópicas contribuem conjuntamente para que ocorra esse fenômeno.

O objetivo geral do estudo é:

- Diagnosticar a erosão laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba, a partir da modelagem distribuída do potencial de perdas de solo, considerando os fatores naturais e antrópico da EUPS, e da elaboração de mapas temáticos.

De modo mais específico, o estudo propõe a realização dos seguintes objetivos:

- Estimar as perdas de solo através da EUPS;
- Mapear o Potencial Natural à Erosão (PNE);
- Avaliar as condições atuais de Uso e Cobertura do Solo, por meio da elaboração de um mapeamento com um nível de detalhamento correspondente à 1:50.000;

➤ Mapear o Potencial Atual à Erosão (Ea).

A EUPS é uma referência em estudos de erosão e perdas de solo e foi o modelo utilizado por considerar os principais fatores naturais e antrópico influentes na erosão. Além disso, possui uma grande aceitação que pode ser notada pelo número de trabalhos desenvolvidos. A influência dos três fatores naturais da EUPS foi analisada conjuntamente, para avaliar o Potencial Natural à Erosão (PNE), independente das formas de ocupação do solo. Já o Potencial Atual à Erosão (Ea) é o produto do PNE e da cobertura e manejo e práticas conservacionistas. O mapeamento do UCS foi elaborado na escala de 1:50.000, a partir da classificação de imagens de satélite do sensor ASTER e da interpretação visual de imagens de alta resolução. Além de servir como base para análise das condições atuais de UCS, representa a camada da interferência antrópica no modelo.

A aplicação da EUPS em escala regional deve ser feita com ressalvas. O modelo não simula apropriadamente a deposição de sedimentos em vertentes côncavas e as perdas de solo por erosão linear em fase avançada. As voçorocas são condicionadas por fatores hidrológicos mais complexos não representados na equação. Devido a esses motivos, os resultados obtidos em escala de bacia hidrográfica não devem ser utilizados para quantificação das taxas perdas de solo. Servem para categorizar qualitativamente as áreas com maior propensão à ocorrência de erosão laminar. As taxas de erosão obtidas com a EUPS são quantificadas mais precisamente em escala de vertente ou em parcela experimental, em que há conhecimento mais detalhado da área de estudo e controle maior dos experimentos.

Foi feita uma análise qualitativa dos resultados por sub-bacia utilizando classes de interpretação. As unidades de análise que apresentam potencial maior ou menor à erosão laminar foram identificadas e comparadas. Essa abordagem apresenta uma contribuição para a identificação da distribuição espacial e da intensidade da erosão laminar na área de estudo, assim como das áreas de risco de aceleração do processo. Dessa forma, constitui uma ferramenta essencial para direcionar ações conservacionistas, propor práticas de manejo mais adequadas e fornecer subsídio para a preservação e conservação da água e do solo.

A dissertação está organizada em seis capítulos. No capítulo 2, foi revisada a bibliografia concernente ao tema abordado: no tópico 2.1, a erosão laminar e os principais mecanismos e agentes atuantes no processo; no tópico 2.2, a EUPS e seus fatores, priorizando os métodos e estudos que utilizam SIG; no tópico 2.3, o sensoriamento remoto e os principais procedimentos envolvidos no mapeamento de UCS como o pré-processamento, o processamento digital de imagens e a construção de uma chave de classificação. No capítulo 3, foi feita uma caracterização ambiental da área de estudo, incluindo aspectos de localização, fisiografia, clima, geologia, geomorfologia, solos e vegetação. Os trabalhos revisados apresentam dados secundários que fundamentam a discussão dos resultados. No capítulo 4, foram apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa. Os materiais são arquivos gráficos (espaciais) e alfanuméricos provenientes de diversos autores e instituições. Os principais procedimentos metodológicos envolvem a obtenção dos fatores da EUPS e a modelagem cartográfica através de um SIG. No capítulo 5 foram apresentados e discutidos os resultados em três tópicos: no 5.1, o mapeamento do UCS; no 5.2, o PNE, que considera os fatores naturais do modelo; e no 5.3, o Ea, que é o cruzamento dos fatores naturais com o fator uso e manejo, representado pelo mapa de UCS. O capítulo 6 apresenta as conclusões e também as recomendações para a elaboração de estudos futuros e para a prevenção da erosão laminar em áreas rurais. Por fim, são listadas as referências bibliográficas.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Erosão dos solos: conceitos e principais fatores intervenientes na erosão laminar

A erosão é um processo de desprendimento e arraste das partículas do solo causado pela água e pelo vento (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999). Na erosão um conjunto de processos atua promovendo a desagregação, a remoção e a deposição, lenta ou acelerada, do material intemperizado<sup>1</sup>. A erosão hídrica, que é provocada pela ação da água, é a mais atuante nos meios tropicais. Os principais elementos naturais que influenciam na erosão hídrica são: chuva, solo, relevo, e cobertura vegetal. O uso e manejo do solo é o condicionante antrópico da erosão (EL-SWAIFY *et al.*, 1982; STEIN, 1995; MORGAN, 2006).

O impacto das gotas de chuva e o escoamento superficial são os agentes ativos na erosão hídrica. Segundo Guerra (2009), o *splash* ou salpicamento é o estágio mais inicial do processo erosivo e é provocado pelo impacto das gotas de chuva no solo (Figura 1). A energia cinética desprendida aumenta com a intensidade da precipitação, da velocidade e do tamanho das gotas. O efeito é a desintegração dos agregados, o que facilita o transporte do material pelos fluxos de água. Além disso, as partículas de tamanhos menores preenchem os poros da superfície do solo e formam crostas, que provocam a selagem e a diminuição das taxas de infiltração. A impermeabilização, somada à saturação de água no solo, provocada pela própria capacidade do solo de reter água, são fatores que, combinados, favorecem a formação de poças e o início do escoamento superficial (*runoff*) ou hortoniano<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>O intemperismo é “o conjunto de modificações de ordem física (desagregação) e química (decomposição) que as rochas sofrem ao aflorar na superfície da Terra” (TOLEDO *et al.*, 2000, p. 140). Existem três tipos de intemperismo. O intemperismo físico é quando ocorre a desintegração sem apresentar alterações químicas e/ou mineralógicas. O intemperismo químico, também designado como decomposição, os produtos resultantes passaram por alterações químicas e mineralógicas. O intemperismo biológico, por sua vez, tem ambos os efeitos (químicos e físicos), e é causado pela ação dos seres vivos (SUGUIO, 2003).

<sup>2</sup> O escoamento hortoniano é um termo usado para designar o escoamento superficial inicial, descrito por Horton (1933), que ocorre quando o volume de água precipitado é maior do que a capacidade de retenção do solo (CHOW *et al.*, 1988).





**Figura 1:** Representação do impacto da chuva no solo (*splash*).  
Fonte: DAAE/IPT (1989)

A erosão provocada pelo escoamento laminar ou em lençol ocorre de forma difusa e contribui para a remoção das camadas mais superficiais do solo. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), na **erosão laminar**, as partículas mais leves do solo são arrastadas primeiramente, sendo então removidas as camadas mais delgadas. Os horizontes superficiais são ricos em nutrientes. Por isso, o processo acelerado pode resultar em prejuízos para o equilíbrio ecológico e para a produtividade agrícola (DORAN *et al.*, 1999). A erosão laminar pode ser evidenciada pela exposição das raízes das plantas, que indica a profundidade da camada de solo perdida. Quando não há manifestação visual é denominada de erosão não aparente.

Já o escoamento de fluxo concentrado provoca a **erosão linear** (SILVA *et al.*, 2003a; NETTO e SOBREIRA, 2006; DRUMMOND e BACELLAR, 2006). A concentração do escoamento em linhas de fluxos preferenciais ocorre devido às irregularidades da superfície, da declividade do terreno ou por obstáculos que desviam os filetes de água. A erosão provocada pelo escoamento concentrado pode se desenvolver recuando as cabeceiras e provocando o aprofundamento e alargamento dos canais. A evolução desse processo forma sulcos, ravinas e voçorocas, estágio mais avançado da erosão linear (OLIVEIRA, 2009).

A suscetibilidade dos solos à erosão está relacionada com a resistência à desagregação e ao transporte das partículas. Segundo Morgan (2006), varia com a textura, a estabilidade dos agregados, a capacidade de infiltração, a quantidade de matéria orgânica e de outros atributos químicos.

A textura influi na capacidade de infiltração e absorção da água, e na maior ou menor coesão entre as partículas. Os solos de textura arenosa são normalmente mais porosos, o que facilita a rápida infiltração da água. Além disso, as partículas mais grosserias são mais resistentes ao transporte, devido à força necessária para o arraste. Entretanto, as partículas argilosas são mais resistentes à desagregação por causa da coesão da argila. Solos com muita quantidade de silte e areia fina geralmente são muito erodíveis (LAL e ELLIOT, 1994).

O gradiente textural entre os horizontes do solo é outra característica importante que influi no comportamento do solo em relação à erosão. Solos que apresentam teores de areia no horizonte A muito mais altos do que no horizonte B tendem a serem bastante suscetíveis à erosão (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985). A movimentação e o acúmulo de argila no horizonte subjacente apresentam uma barreira à infiltração da água. Isso permite uma rápida saturação do horizonte superior e o desenvolvimento de enxurradas. Esse fenômeno ocorre tipicamente nos Argissolos, Planossolos e Luvisolos.

Segundo Norton *et al.* (1999), a argila possui um comportamento variável quando combinada com a matéria orgânica e outros elementos químicos. Essas combinações influem na agregação entre as partículas e na resistência do solo à erosão. A incorporação de matéria orgânica no solo induz o aumento da agregação e coesão entre as partículas, tornando-o mais poroso e estável. As perdas de argilo-minerais e matéria orgânica geralmente favorecem o enrijecimento do solo e a formação de crostas, fazendo aumentar sua suscetibilidade à erosão hídrica (FONSECA, 2009). Segundo Silva *et al.* (2009a), um dos motivos da alta erodibilidade dos Cambissolos é devido à formação de encrostamento.

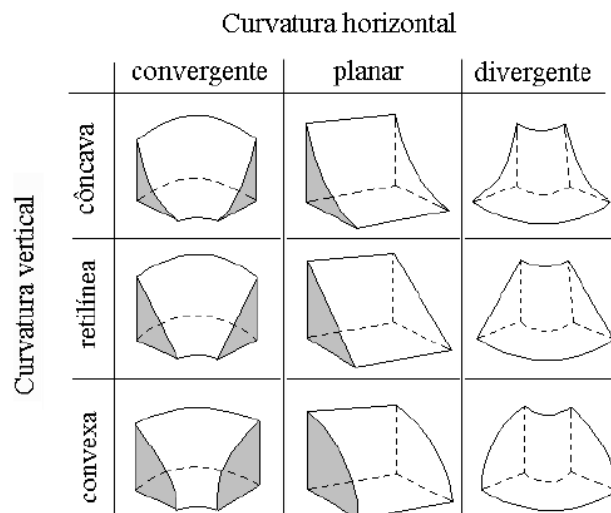
Já a estrutura representa o modo como se arranjam as partículas do solo. Solos com estrutura granular, como os Latossolos, apresentam alta porcentagem de poros, alta permeabilidade e agregação entre as partículas. Por isso, possuem alta capacidade de infiltração da água e resistência ao arraste das partículas, mesmo possuindo textura

argilosa. Por outro lado, solos com estruturas poliédricas (prismáticas ou em blocos) tendem a ser menos porosos e permeáveis do que os Latossolos (SALOMÃO, 2009).

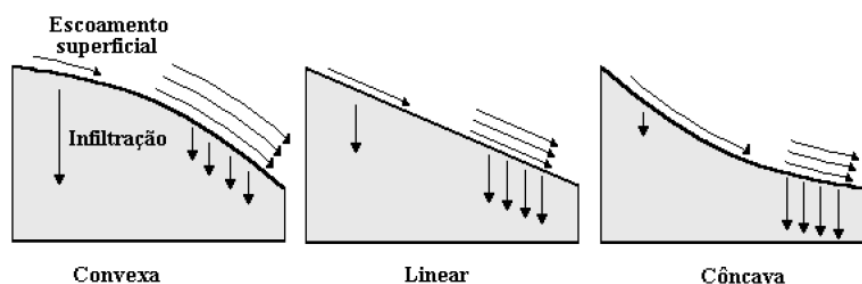
Outra característica que influi na resistência do solo à erosão é a espessura. Solos rasos possuem capacidade menor de armazenamento de água devido à baixa profundidade. Com isso, a saturação de água nos horizontes superiores é rápida, favorecendo o escoamento superficial. Os Neossolos Litólicos, por serem rasos, são bastante suscetíveis à erosão.

O relevo é outro fator muito importante no processo da erosão. Os aspectos relacionados ao arranjo espacial dos elementos que configuram o modelado superficial são indicadores do grau de energia do relevo e representam a suscetibilidade à ocorrência de processos erosivos ou deposicionais (GREGORY e WALLING, 1973; CHORLEY, 1978; KIRKBY, 1994). A erosão é mais intensa em vertentes extensas e com alta declividade. Quanto mais íngreme o relevo menor a infiltração da água, o que acaba favorecendo o deflúvio. Declividades acentuadas também favorecem a velocidade do *runoff*, aumentando sua capacidade erosiva. Em uma vertente extensa, a lâmina de água se torna mais espessa em função do acúmulo. Com isso, enxurradas são formadas e há mais força para arraste do material superficial.

A forma das vertentes também é determinante no comportamento do escoamento superficial e da erosão (CHRISTOFOLETTI, 1980; VALERIANO, 2008). Essas formas são agrupadas em duas categorias: curvatura vertical e curvatura horizontal. A curvatura vertical é classificada em côncava, retilínea e convexa, enquanto a curvatura horizontal em convergente, linear e divergente. É possível observar, na Figura 2, que a combinação dessas classes resulta em nove formas do terreno. A curvatura horizontal do tipo convergente tende a concentrar o escoamento superficial, enquanto a do tipo divergente tende a produzir o escoamento difuso. Já o comportamento do escoamento superficial e da infiltração da água das classes de curvatura vertical está representado com detalhamento na Figura 3. Nas vertentes côncavas há uma diminuição da declividade do topo para a base que favorece a infiltração da água e o depósito do material transportado no trecho inferior. Nas curvaturas convexas acontece o contrário: a declividade e a velocidade do fluxo tendem a aumentar, favorecendo a erosão.



**Figura 2:** Curvatura horizontal e vertical das vertentes  
Fonte: Valeriano (2008)

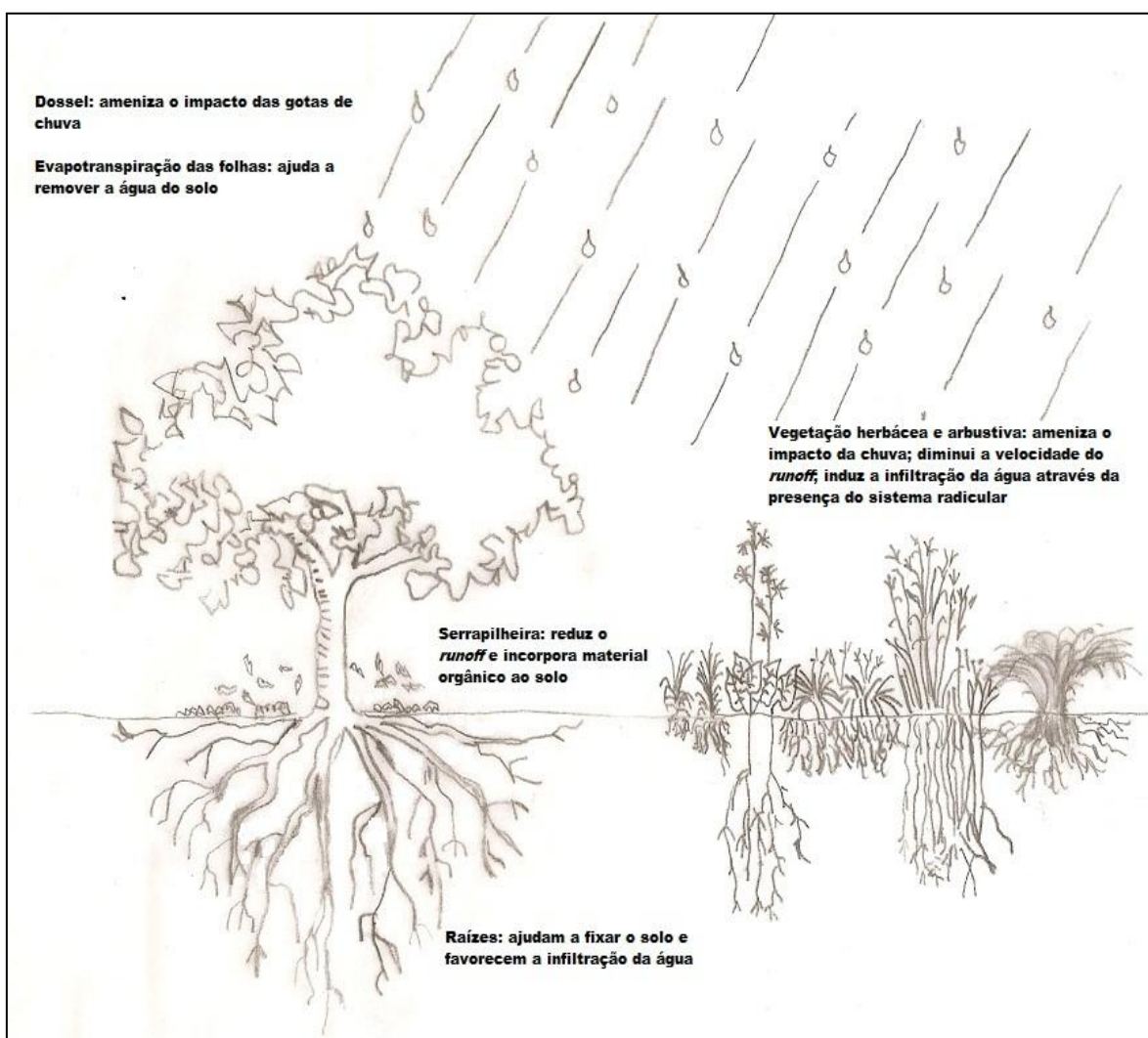


**Figura 3:** Comportamento do escoamento superficial e da infiltração em curvaturas verticais  
Fonte: Negreiros (2003)

A cobertura vegetal atua como uma camada protetora entre a atmosfera e o solo. Segundo Stocking (1994), não existe uma correlação linear entre porcentagem de cobertura do solo e diminuição das perdas de solo. Estudos revelam que uma cobertura de 60% de vegetação pode ser tão efetiva quanto um solo totalmente coberto. A influência da vegetação no controle da erosão é condicionada por diversos fatores interativos entre a planta e o solo (AYRES, 1960; STOCKING, 1994; MORGAN, 2006). Dentre esses processos, podem ser destacados (Figura 4):

- Amenização do impacto direto das gotas de chuva no solo;
- Redução da velocidade do *runoff* pela rugosidade da superfície (serrapilheira);
- Fixação do solo pelas raízes;
- Favorecimento da infiltração provocada pela presença de raízes;
- Retirada de água do solo através do processo de evapotranspiração;

- Incorporação de matéria orgânica decomposta, que traz benefícios químicos e físicos para as camadas superficiais do solo.



**Figura 4:** Principais funções da vegetação no controle do processo erosivo

A água que atinge a vegetação pode ficar retida no dossel e evaporar ou atingir o solo pelo gotejamento das folhas e pelo fluxo de tronco (*stemflow*). De uma forma geral, as folhas e galhos exercem a função de interceptar a água e amenizar o impacto provocado pelas gotas de chuva. Portanto, uma das principais funções da vegetação é diminuir o volume e reduzir a energia cinética da chuva que atinge ao solo. A amenização do impacto das gotas de chuva depende da altura e da cobertura do dossel. No caso de alguns tipos de vegetação arbórea, gotas de chuva de diâmetro maior podem ser formadas na copa das árvores e atingir o solo. Nesse caso, a energia cinética não altera significativamente em relação à chuva inicial, podendo até aumentar (MORGAN, 2006).

O efeito da água que chega ao solo também pode ser amenizado por folhas, galhos e outros resíduos que promovem a rugosidade (*roughness*) da superfície. As florestas densas são as maiores produtoras desse material residual orgânico, ou serrapilheira<sup>3</sup>. Além dos resíduos amenizarem o impacto direto das gotas de chuva, também fazem diminuir a velocidade do escoamento (RICKSON, 1990). O atrito provocado pelo material que recobre a superfície faz aumentar a resistência ao cisalhamento do solo.

A serrapilheira também incorpora matéria orgânica às camadas superficiais. Esse resto orgânico, após decomposição, se transforma em húmus, que funciona de forma similar aos argilominerais. Constitui-se um colóide altamente capaz de absorver e trocar cátions e nutrientes. Portanto, a matéria orgânica melhora as qualidades químicas (carbono orgânico) e físicas (permeabilidade, porosidade e retenção de água) do solo (LEPSCH, 2002).

Na subsuperfície, as raízes desempenham uma função importante, pois aumentam a porosidade, a capacidade de infiltração da água e a coesão do solo. Já os microorganismos atuam no desenvolvimento das plantas, contribuindo para a decomposição da matéria orgânica e fornecendo nutrientes. Segundo Melloni *et al.* (2008), os organismos também têm importância nos aspectos ligados à estruturação do solo, mesmo que indiretamente. Um deles é a contribuição no desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Em áreas de vegetação nativa, esses processos atuam continuamente, promovendo a proteção do solo da erosão hídrica. Nas culturas agrícolas, a quantidade de perda de solo depende do grau de cobertura vegetal e da intensidade de movimentação e desagregação do solo. Segundo Bigarella e Mazuschowski (1985), a erosão acelerada começa a aparecer em áreas rurais quando a vegetação é removida e o solo preparado fica exposto aos agentes climáticos.

Em resumo, o preparo do solo é a manipulação física, química e biológica do solo com o objetivo de aperfeiçoar a germinação das sementes e o desenvolvimento das plantas. Segundo Castro (1985), podem ser divididos em três categorias: i) preparo primário do solo, ii) preparo secundário do solo, e iii) cultivo do solo após plantio. No preparo

---

<sup>3</sup> Serrapilheira é a camada que reveste o solo sendo formada pelo acúmulo de matéria orgânica morta em diferentes estágios de decomposição. É composta por restos vegetais como folhas, troncos, ramos, frutos, sementes, e também por restos de animais, excretas e material fecal.

primário, estão incluídas as operações convencionais mais grosseiras, como a aração<sup>4</sup> e o desmatamento. As operações de preparo secundário envolvem operações superficiais para nivelção do terreno e controle das ervas daninhas como, por exemplo, a gradagem<sup>5</sup>. Já o cultivo do solo após o plantio é a manipulação do solo após a implantação da cultura. Não há alteração significativa das propriedades físicas do solo, utilizando-se somente herbicidas e operações manuais para o controle das ervas daninhas.

Entre essas operações, a redução das perdas de solo diminui do primeiro para o terceiro sistema de preparo (SCHICK *et al.*, 2000; AMARAL *et al.*, 2008). De modo geral, o aumento na intensidade do preparo resulta em menor cobertura devido à remoção dos restos culturais da superfície. Em adição, deixa a camada superficial do solo mais fragmentada e exposta à ação direta das chuvas. A fase crítica da erosão é na época em que não há cobertura residual e nos primeiros 30 dias de desenvolvimento da lavoura. Nessa etapa inicial, ainda apresentam baixa cobertura foliar e possuem sistema radicular pequeno. Quando essa fase coincide com as chuvas mais intensas, são verificadas as maiores perdas de solo.

## 2.2 Equação Universal de Perdas de Solo e Sistemas de Informação Geográfica

A Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) é um modelo empírico<sup>6</sup> para prever a média de perda de solo em longos períodos. Foi desenvolvida no *Agricultural Research Service* em cooperação com a Universidade de *Purdue*, a partir da evolução de equações de perda de solo elaboradas anteriormente, e da reunião e interpretação analítica e estatística de dados de perdas de solo e de água. O experimento ocorreu em várias parcelas

---

<sup>4</sup> Aração é o processo de revolvimento do solo com a finalidade de descompactar a terra e remover os restos culturais anteriores ou ervas daninhas.

<sup>5</sup> Gradagem é a nivelção do terreno e desagregação dos torrões de terra com a utilização de grade niveladora para tornar a superfície mais uniforme.

<sup>6</sup> Os modelos empíricos ou “caixa-preta” utilizam dados observados para o tratamento estatístico das funções e não tem relação com os processos físicos envolvidos. Já nos modelos mecanísticos (conceituais e fisicamente fundamentados) são considerados os processos físicos nas funções utilizadas (VON SPERLING, 2007; RENNÓ; SOARES, 2000).

experimentais<sup>7</sup> sob condições naturais e simuladas de chuva (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Devido à base totalmente empírica, a aplicação da EUPS em situações diferentes das utilizadas na realização dos experimentos requer a realização de pesquisas para a adequação dos fatores (LOCH e ROSEWELL, 1992).

Nesse sentido, Renard *et al.* (1994) e Toy *et al.* (1999) comentam que a equação e seus parâmetros passaram por desenvolvimentos conceituais e metodológicos nas décadas seguintes da sua elaboração. A evolução dos algoritmos para o cálculo do fator topográfico e o desenvolvimento de pesquisas e métodos para a obtenção dos valores de erodibilidade e erosividade para as condições edafoclimáticas de algumas regiões foram alguns dos principais aprimoramentos. Por outro lado, a integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG)<sup>8</sup> facilitou o armazenamento e a integração dos dados, a inserção de algoritmos e modelos, a obtenção de parâmetros de forma automatizada e também a aplicação distribuída (em bacias hidrográficas) e em grandes áreas (FISTIKOGLU e HARMANCIOGLU, 2003).

A concepção inicial do modelo prevê o cálculo das perdas de solo total, sem diferenciar entre erosão laminar ou linear (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Porém, não estima a erosão em sulcos em fase mais avançada (AMORIM, SILVA e PRUSKI, 2009). Embora se admita a validade universal dos fatores de EUPS, as formas erosivas lineares do tipo voçorocas são condicionadas por fatores hidrológicos e geomorfológicos complexos que não são representados pelos fatores da equação. Por isso, a utilização da EUPS, principalmente quando aplicada em escala regional, é restrita à análise do processo de erosão laminar (DAAE/IPT, 1989).

---

<sup>7</sup> A parcela padrão da EUPS tem 22,1m de comprimento e declividade uniforme de 9%. Não deve ter atividades agrícolas e ser continuamente descoberta por qualquer tipo de cobertura vegetal (RENARD *et al.*, 1994).

<sup>8</sup> Os SIG são ferramentas computacionais para manipulação e análise da informação espacial. Configuram-se como instrumentos do geoprocessamento que processam dados gráficos (espaciais) e não gráficos (alfanuméricos). Em muitos projetos, são utilizados para combinar dados espaciais de diversas fontes e analisar as interações através do uso de modelos (BOHAM-CARTER, 1994). Segundo Singh e Frevert (2006) o desenvolvimento de plataformas computacionais e a integração com o SIG têm se constituído fatores fundamentais para a difusão da modelagem.



A equação também não prevê eventos de chuva isolados, impossibilitando a constatação de eventos responsáveis por grandes perdas de solo. A EUPS também não estima 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). Não representar os eventos de chuva isolados e os detalhes dos processos hidrológicos da erosão se constitui algumas das principais limitações da EUPS (MACHADO, 2002).

Devido aos motivos mencionados, a aplicação em escala de bacia hidrográfica deve ser feita com ressalvas. Os resultados de perdas de solo não devem ser utilizados como taxas reais de erosão. A finalidade principal desse tipo de abordagem é a análise do potencial de ocorrência de erosão laminar e da elaboração de cartografia de áreas de risco de erosão acelerada. Apesar das limitações, a EUPS é considerada uma das principais referências em estudos de perdas de solo e tem sido uma ferramenta amplamente utilizada para auxiliar no planejamento e conservação das terras. Entre os estudos da EUPS associada com SIG desenvolvidos no Brasil, estão os elaborados por Stein *et al.* (1987), Chaves (1994), Silva (2004b), Costa (2005), Tomazoni e Guimarães (2005), Batalha (2006), Farinasso *et al.* (2006), Ruhoff (2006), Ribeiro e Alves (2007), Mata (2009), Borges (2009), Miguel (2010).

A EUPS, representada pela Equação 1, é composta pelos seguintes fatores:

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

Onde:

A = perda de solo calculada por unidade de área, em ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );

R = fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )

K = fator de erodibilidade do solo ( $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ )

LS = fator topográfico (adimensional);

CP = fator uso e manejo e fator prática conservacionista (adimensional).

O **fator de erosividade (R)** significa a capacidade da chuva de causar erosão no solo sem cobertura. Representa o efeito da erosão por impacto, salpico e a turbulência combinado com a enxurrada que transporta as partículas sólidas desprendidas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999).

O R é determinado usualmente calculando o  $EI_{30}$ , que é o índice de erosão da chuva. O  $EI_{30}$  representa o produto da energia cinética da chuva ( $E_c$ ) e da intensidade máxima em 30 minutos ( $I_{30}$ ).

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad (2)$$

O valor da intensidade máxima da chuva é calculado por diagramas de pluviógrafos, em eventos de 30 minutos (mm/hora). A soma dos valores de  $EI_{30}$  em determinado período de tempo proporciona um valor numérico da erosividade da chuva para esse período. O valor de R é usualmente determinado pela média dos valores anuais do  $EI_{30}$  de um longo período de tempo, geralmente vinte anos ou mais (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999).

Como há escassez de dados e medições de pluviógrafos (que medem a intensidade da chuva), diversos autores utilizam dados pluviométricos para a determinação desse índice. Uma abordagem bastante difundida é a associação do  $EI_{30}$  ao índice de *Fournier* ( $R_c$ ). Essa relação foi ajustada para as condições climáticas de vários locais do território brasileiro (SILVA, SCHULZ e CAMARGO, 2003). Nessas formulações matemáticas são necessárias somente médias mensais e anuais de pluviometria como variáveis para o cálculo da erosividade. O índice de *Fournier* é representado pela Equação 3:

$$R_c = \frac{p^2}{P} \quad (3)$$

Onde:

$R_c$  = média mensal do índice de erosão;

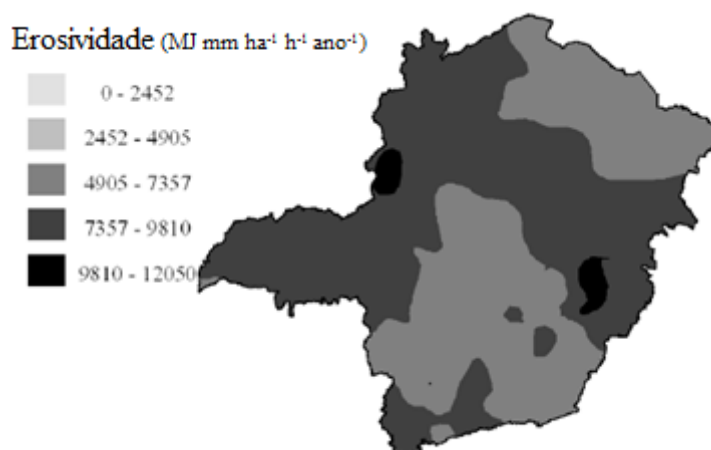
$P$  = precipitação média mensal (mm);

$P$  = precipitação média anual (mm).

Silva (2004a) fez um estudo sobre a erosividade da chuva no Brasil, por meio de várias correlações desenvolvidas a partir do índice de *Fournier* e de equações lineares e exponenciais. Foram utilizados dados de 1.600 estações de monitoramento por todo o país, com série histórica de, no mínimo, 10 anos. Os resultados revelam que a erosividade da chuva no país varia entre 3.116 e 20.035 MJ mm ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo que 68% são

considerados fortes ou muito fortes. Os valores mais altos estão no noroeste do país, enquanto os mais baixos, na região nordeste. A comparação dos valores de R e pluviométricos demonstrou haver uma forte correlação entre o total precipitado e a erosividade da chuva, apresentando um coeficiente de determinação de 0,975.

Mello *et al.* (2007) estimaram e mapearam a erosividade da chuva média (mensal e anual) no estado de Minas Gerais. Foram utilizados dados de 248 estações. A erosividade anual média no estado variou de 5.000 a mais de 12.000 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 5), com total de precipitação oscilando entre 800 e 1.700 mm. Um coeficiente de determinação de apenas 0,115 demonstrou que a erosividade não apresenta dependência do total precipitado. O autor conclui que o efeito orográfico e as características climáticas locais determinam o comportamento espacial da erosividade da chuva no estado.



**Figura 5:** Erosividade da chuva para o estado de Minas Gerais  
Fonte: Mello *et al.* (2007).

A **erodibilidade (K)** é a vulnerabilidade ou suscetibilidade do solo à erosão e representa a facilidade em que as partículas do solo são destacadas e transportadas. O fator de erodibilidade é a relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva para um solo específico, sendo tais dados obtidos individualmente para cada chuva (MANNIGEL *et al.*, 2002).

Segundo Wischmeier e Smith (1978), a erodibilidade é o resultado de uma interação complexa das propriedades físicas e químicas dos solos. Dessas propriedades, as que mais influenciam são: “aquelas que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e

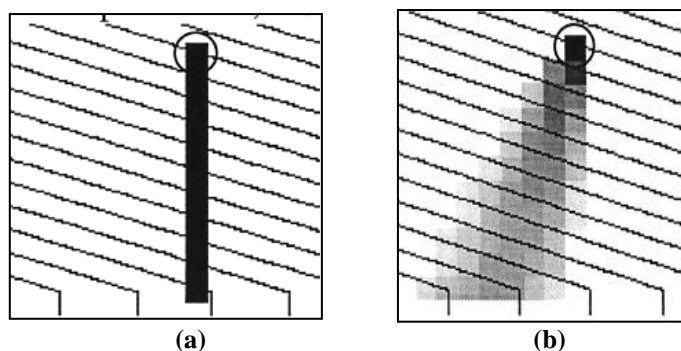
capacidade total de armazenamento de água, e aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento” (FARINASSO *et al.*, 2006, p.76).

Segundo Silva *et al.* (2000), existem basicamente três maneiras de se determinar o fator de erodibilidade dos solos: (i) em condições de campo, sob chuva natural; (ii) nas mesmas condições que a anterior, porém sob chuva simulada; (iii) através de equações de regressão múltiplas que contenham, como variável independente, atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo. Nas duas primeiras situações o fator K é obtido através da relação entre a perda de solos e a erosividade da chuva. A quantificação é realizada em parcelas experimentais que é a unidade padrão preconizada na EUPS. Na terceira abordagem as equações de regressão são desenvolvidas a partir da relação entre os atributos do solo e do fator K medido em campo. Depois são extrapoladas para outros perfis de solos da mesma classe. O método indireto é bastante utilizado devido à dificuldade em obter dados a partir de observação direta com experimentação de campo (MARQUES *et al.*, 1997; LIMA, 2007).

Os fatores **comprimento do declive (L)** e **grau de declive (S)** são representados na equação original separadamente. Porém, para aplicação prática, constituem o **fator topográfico (LS)** que considera o efeito do relevo sobre a erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999; CARVALHO JÚNIOR e GUIMARÃES, 2003). O L é definido por Wischmeier e Smith (1978) pela distância do ponto de origem do escoamento ao ponto onde: (i) a gradiente de declividade é suficientemente reduzida para haver iniciação de deposição do material, ou (ii) quando o escoamento atinge um canal de drenagem. O S é o ângulo ou índice de inclinação do terreno em relação ao plano horizontal.

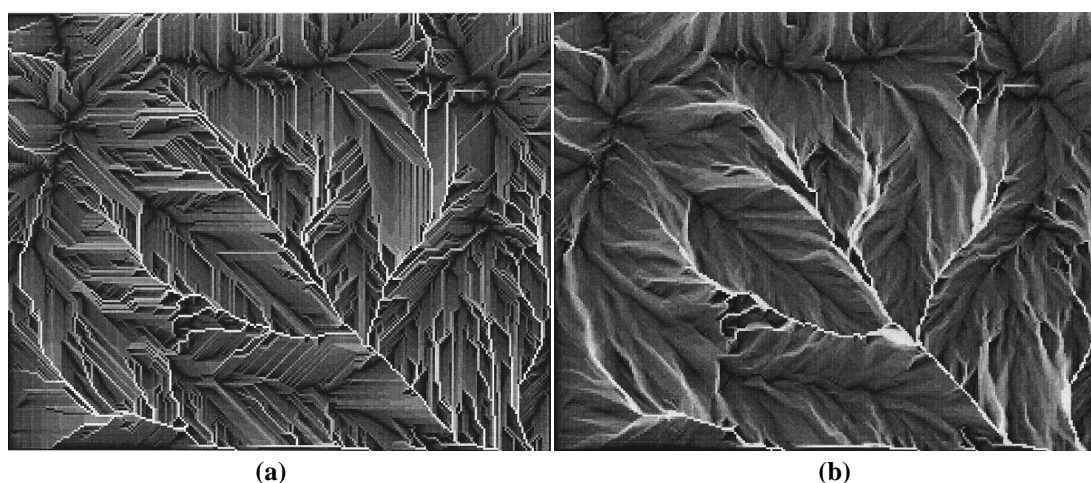
Inicialmente, a EUPS foi desenvolvida para trechos de declives uniformes e não muito acentuados. Novas metodologias foram desenvolvidas para aplicação em declives considerados mais complexos (SILVA, 2003). Uma delas foi a introdução do conceito de área de contribuição, que trouxe uma nova abordagem para a estimativa do comprimento de rampa. A partir dessa concepção é considerado não somente o comprimento da vertente, mas a área à montante que contribui para um determinado ponto (*pixel*). É possível observar na Figura 6 que o fluxo acumulado e a convergência/divergência do escoamento são considerados, ao invés de somente o fluxo único e retilíneo, representando melhor o

fluxo superficial e o curso da erosão. Isso promoveu uma maior acurácia da modelagem dos processos erosivos provenientes do fluxo laminar sobre declives (DESMET e GOVERS, 1996; CARVALHO JÚNIOR e GUIMARÃES, 2003).



**Figura 6:** Representação do (a) fluxo único e retilíneo e do (b) fluxo acumulado da área de contribuição  
Fonte: Tarbotoon (1997)

Alguns autores (QUINN *et al.*, 1991; DESMET e GOOVERS, 1996; TARBOTOON, 1997) propuseram algoritmos para o cálculo automático do fator topográfico a partir do conceito de área de contribuição. Essas metodologias propostas foram desenvolvidas para serem aplicadas em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE). A automatização e a integração com o SIG trouxeram várias vantagens em relação aos métodos manuais. Entre elas, estão a adoção do conceito de unidade de área de contribuição – substituindo o comprimento de rampa, conforme mencionado anteriormente – e a eficiência e rapidez do método automático na obtenção dos resultados. A Figura 7 ilustra a diferença entre o fluxo único e o fluxo da área de contribuição através de um MDE.



**Figura 7:** Representação em Modelo Digital de Elevação do (a) fluxo único e (b) fluxo considerando a área de contribuição  
Fonte: Tarbotoon (1997)

O fator de **Cobertura e Manejo (C)** é a relação da perda de solo de uma área cultivada sob condições específicas, com certo tipo de cobertura, e a perda correspondente para mesma área sem cobertura (WISCHMEIER e SMITH, 1978). O fator **Prática Conservacionista (P)** é “a relação entre a intensidade esperada de tais perdas com determinada prática conservacionista e aquelas quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo).” (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999, p.266). As práticas mencionadas implicam o tipo de tecnologia empregada como, por exemplo, plantio em curva de nível e terraceamento. Segundo Wischmeier e Smith (1978), os fatores C e P não podem ser analisados separadamente porque estão significativamente relacionados. O fator **CP** representa o efeito combinado das variáveis cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas.

Wischmeier (1975) utilizou a abordagem de subfatores para desenvolver o fator C. Na ocasião, ele considerou 3 variáveis: (i) dossel, (ii) cobertura superficial rasteira, (iii) efeitos de subsuperfície. As pesquisas e experimentos foram desenvolvidos principalmente para áreas de cultivo agrícola. Entretanto, Dissmeyer e Foster (1985) propuseram uma modificação da EUPS para terras florestais. Os autores consideraram diversos fatores intervenientes na erosão em florestas, entre os quais: quantidade de solo exposto, cobertura do dossel, quantidade de material orgânico, raízes e efeito da cobertura residual.

Stein *et al.* (1987) atribuíram os valores de CP em função do tipo de ocupação e do porte e densidade da cobertura vegetal. Na Tabela 1, nota-se que há duas grandes divisões: grupo e categoria. Os grupos estão associados ao porte e ao grau de cobertura proporcionado pelo tipo de vegetação ou cultura agrícola, que estão especificadas na coluna categoria. Os valores de CP são menores para a vegetação de porte alto a médio como, por exemplo, a vegetação florestal nativa e o reflorestamento. Quanto mais baixo o porte da vegetação e o grau de cobertura que oferece, maiores são as perdas de solo e os valores de CP. Para os corpos de água e as ocupações antrópicas diversas, o valor de CP é nulo. Segundo os autores, o cálculo do fator C foi baseado na sistemática de Bertoni e Lombardi Neto (1999), 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, adotou-se  $P=1$ , que representa a pior situação possível de práticas conservacionistas. A utilização dessa abordagem resulta em valores exagerados de CP, contudo, representa uma

aproximação adequada para aplicação regional com utilização de imagens do sensoriamento remoto.

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

<b>GRUPO</b>	<b>CATEGORIA</b>	<b>CP</b>
<b>1. Vegetação de porte alto a médio, cobertura total do terreno.</b>		0,00004
	1a. Floresta	0,00004
	1b. Vegetação Secundária	0,00004
	1c. Cerradão	0,00004
	1d. Reflorestamento	0,0001
<b>2. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura total do terreno.</b>		0,01035
	2a. Cobertura residual	0,0007
	2b. Cerrado	0,0007
	2c. Cultura permanente	0,02
	2d. Cana-de-açúcar	0,05
<b>3. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno.</b>		0,25
	3a. Cobertura residual	0,25
	3b. Cultura perene	0,25
<b>4. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura total do terreno.</b>		0,01
	4a. Cobertura residual	0,01
	4b. Pastagem	0,01
	4c. Cultura temporária	0,20
	4d. Campo cerrado	0,01
	4e. Campo natural	0,01
<b>5. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno.</b>		0,10
	5a. Cobertura residual	0,10
	5b. Pastagem	0,10
	5c. Cultura temporária	0,20
<b>6. Ocupações naturais diversas</b>		0,00
	6a. Várzea	0,00
	6b. Espelho d'água	0,00
<b>7. Ocupações antrópicas diversas</b>		0,00
	7a. Área urbanizada	0,00
	7b. Estrada	0,00

Fonte: Stein *et al.* (1987).

### 2.3 Sensoriamento Remoto e Classificação de Uso e Cobertura do Solo

No processo de classificação do Uso e Cobertura do Solo (UCS) as imagens são manipuladas e interpretadas em uma rotina de Processamento Digital de Imagens (PDI). O PDI possui uma grande variedade de operações, porém há duas principais aplicações em estudos ambientais, que são a “melhoria da informação visual para interpretação humana e o processamento de dados de cenas para percepção automática através de máquinas” (GONZALEZ e WOODS, 2000, p.1). Para essas duas aplicações, é frequentemente necessário efetuar uma série de procedimentos ou pré-processamento, visando à redução de erros e imperfeições na imagem.

#### *Pré-processamento*

O pré-processamento é a primeira etapa, em que os erros nas imagens são corrigidos antes de extrair as informações de interesse. Os dois tipos de erros mais comuns encontrados no sensoriamento remoto são radiométricos e geométricos (JENSEN, 2005).

A correção radiométrica é feita para corrigir os erros de degradação e o ruído radiométrico. Alguns defeitos são corrigidos na própria estação de recepção das imagens, outros necessitam ser corrigidos pelo usuário. Os erros radiométricos podem ocorrer em função de distorções introduzidas pelos sensores, saturação de algum detector, problemas na aquisição, registro, transmissão, ou processamento de dados em terra. As correções radiométricas mais comuns são restauração e correção de linhas ruins e de *pixels* isolados (FONSECA, 2000).

Os erros geométricos ocorrem devido às distorções ou deformações provocadas por duas fontes principais: observador ou sistema de aquisição (plataforma, sensor) e observado (atmosfera e Terra) (ARAÚJO *et al.*, 2007). A correção geométrica é feita para corrigir essas distorções e transformar a imagem para uma projeção e sistema de coordenadas definidos. É também chamada de georeferenciamento e utilizada principalmente para sobrepor a imagem com outras camadas que têm a mesma referência espacial. Para isso, é necessário o uso de uma função matemática, que podem ser modelos empíricos 2D/3D (como os polinomiais 2D/3D ou funções racionais 3D) ou modelos físicos e

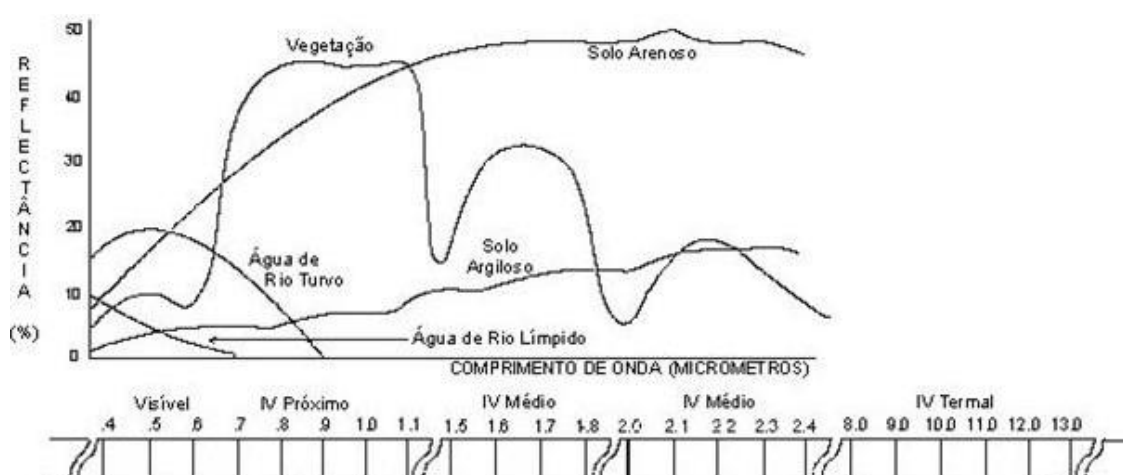


determinísticos 2D/3D (TOUTIN, 2004). Os modelos 2D fazem a correção planimétrica da imagem enquanto os tridimensionais consideram a geometria do relevo. O método de correção geométrica fundamentado na consideração de dados altimétricos (3D), ou ortorretificação, proporciona um melhor ajuste em relação à superfície terrestre (MATHER, 2004).

### *Sensoriamento Remoto aplicado na classificação de Uso e Cobertura do Solo*

Segundo Daniels (2006), os sensores remotos com imageamento multiespectral são baseados na teoria de que os tipos de cobertura do solo refletem a radiação eletromagnética (REM) de forma diferente. Isso permite a identificação de objetos e a extração de informação de interesse em uma imagem. Cada objeto possui uma característica físico-química específica, fazendo com que tenham respostas diversas (absorção, transmissão ou reflexão) quando interagem com a REM. A proporção da energia em contato com um alvo, para cada uma dessas interações, vai depender da natureza da superfície, do comprimento de onda da energia e do ângulo de iluminação (CAMPBELL, 2002).

A reflectância (proporção da energia refletida com a recebida) dos objetos é o que mais interessa para a análise e classificação do UCS. O comportamento do objeto com relação à reflectância caracteriza a assinatura espectral do alvo. A Figura 8 demonstra o comportamento espectral de alguns dos principais alvos do sensoriamento remoto.

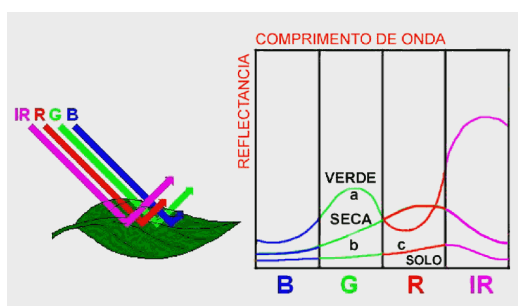


**Figura 8:** Gráfico de reflectância dos principais objetos da superfície terrestre  
Fonte: <http://www.fgel.uerj.br/labgis>

A água é o elemento que ocorre em maior abundância na superfície terrestre, podendo estar na forma líquida, sólida ou gasosa. A turbidez e a profundidade dos corpos de água influenciam decisivamente na assinatura espectral desses alvos. É possível observar que a água turva reflete mais nas bandas do visível do que a água límpida (Figura 8). Page e Frazier (2000) fizeram estudos analisando o comportamento dos corpos de água nas bandas do sensor *Landsat* TM e concluíram que as bandas do infravermelho foram as que apresentaram os melhores resultados para mapear os corpos de água, devido ao contraste apresentado com outros elementos da paisagem.

As características de reflectância espectral dos solos são em função dos seguintes fatores: textura, umidade, matéria orgânica, óxidos de ferro, salinidade e rugosidade superficial (BEN-DOR *et al.*, 1999; JENSEN, 2009). As rochas e minerais refletem e absorvem a REM de forma bastante variada. A Figura 8 ilustra a diferença expressiva da reflectância entre os solos de textura argilosa e arenosa. Geralmente, as bandas do infravermelho térmico são bastante utilizadas para diferenciar estes alvos.

A importância da vegetação é de primeira ordem, já que cobre grande parte da superfície terrestre. Pode também ser associada diretamente aos outros processos e elementos da paisagem (solos, clima, relevo). A folha verde possui uma maior reflectância no infravermelho devido à interação da radiação com os aspectos fisiológicos e o conteúdo de água da estrutura superficial da folha. Por isso, o infravermelho pode ser usado para analisar o estágio de desenvolvimento e sanidade da vegetação. Na Figura 9, é apresentada a reflectância das folhas verdes e secas para quatro bandas (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) de sensores multiespectrais. A folha seca reflete menos nas bandas azul, verde e infravermelho; porém, a reflectância é maior no vermelho.



**Figura 9:** Comportamento espectral da folha e do solo

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

O processo de classificação de imagens consiste em dois estágios: (i) reconhecimento das categorias dos objetos do mundo real e (ii) rotulação das entidades (*pixels*) a serem classificados (MATHER, 2004). Portanto, o processo de classificação se baseia no reconhecimento das classes de UCS que ocorrem na área a ser mapeada e da rotulação das amostras de *pixels* na imagem. O reconhecimento das classes a serem mapeadas é feito a partir de trabalho de campo e de outros mapas de UCS já elaborados (MCCOY, 2005). A diferenciação dos objetos (*pixels*) e a extração das informações de interesse são realizadas por métodos que se apoiam nas características espectrais e em alguns elementos básicos da imagem (tonalidade/cor, textura, tamanho, forma, sombra, altura, padrão e localização).

Os dois métodos mais comuns de classificação de UCS com base na característica espectral dos *pixels* (*por pixel*) são: supervisionado e não-supervisionado. Segundo Lillesand e Kiefer (1994), no método não-supervisionado a imagem é classificada através da agregação automática de grupos com características espectrais semelhantes (*clusters*). Em seguida o analista determina a identidade/rótulo desses grupos. Na classificação supervisionada, o analista seleciona amostras na imagem denominadas de áreas de treinamento. Tais amostras podem ser derivadas de observações de campo, mapas temáticos, fotografias aéreas e da interpretação visual da imagem (TSO e MATHER, 2001). As estatísticas dos *pixels* também são analisadas por meio de histogramas e scattergramas. Toda essa análise fundamenta a atribuição dos rótulos que correspondem às classes determinadas em uma chave de classificação. Manandhar *et al.* (2009) mencionam que um método estatístico bastante utilizado na classificação supervisionada é o algoritmo de Máxima Verossimilhança (MAXVER). Nesse método, é calculada a distribuição de probabilidade (média, variância e covariância) de cada uma das classes de amostragem. Posteriormente, cada *pixel* da imagem é rotulado na classe cuja probabilidade de pertencimento é maior (LILLESAND e KIEFER, 1994; CHEN, 2003).

Além dos métodos de classificação de imagens, outra abordagem em mapeamento de UCS é apoiada em métodos de interpretação visual. As características da imagem como, por exemplo, textura, cor, sombra, forma, tamanho, e o conhecimento sobre a área mapeada são utilizados na identificação de padrões de UCS (BARRET e CURTIS, 1982). A digitalização e edição dos arquivos vetoriais são comumente feitas por meio do uso de SIG. O mapeamento conjugado utilizando métodos de classificação e interpretação visual

de imagens se constitui uma abordagem bastante viável, principalmente para aplicação em grandes áreas.

### ***Chave de classificação***

Um sistema de classificação deve levar em consideração alguns princípios básicos: (i) atender à necessidade do usuário e às características particulares da área de estudo e (ii) ser ao mesmo tempo o mais universal possível, para permitir a padronização e compartilhamento das informações.

Anderson *et al.*(1976) elaboraram um sistema de classificação de UCS para ser utilizado com dados de Sensoriamento Remoto. Para os autores, um sistema de classificação deve seguir os seguintes critérios: (1) o nível mínimo de precisão na interpretação da identificação das classes de UCS deve ser de 85%; (2) a precisão da interpretação de várias categorias deve ser aproximadamente semelhante; (3) resultados repetidos ou repetitivos devem ser obtidos de um intérprete para outro e em diferentes datas; (4) o sistema de classificação deveria ser aplicável para áreas extensas; (5) a categorização deve permitir que a vegetação e outros tipos de revestimento do solo sejam utilizados como substitutos de atividades; (6) o sistema de classificação deve ser conveniente para uso com dados obtidos por sensoriamento remoto em diferentes épocas do ano; (7) deve ser possível o uso eficaz de subcategorias obtidas de levantamentos no campo ou a partir da utilização de dados de maior escala; (8) deve ser possível a agregação de categorias; (9) comparações com futuros dados de UCS devem ser possíveis e (10) os usos múltiplos da terra devem ser reconhecidos, quando possível.

O sistema proposto por Anderson *et al.* (1976) possui ampla aceitação e utilização (LILLESAND e KIEFER, 1994; SCHOWENGERDT, 2007; JENSEN, 2009). Um dos motivos é que foi elaborado de forma universal e possibilita adaptações às condições de regiões específicas. Ele foi proposto em níveis que vão de I a IV. Os dois primeiros níveis são para escalas/resoluções generalizadas (até 1:80.000 e imagens de baixa e média resolução), enquanto o III e IV são adotados em estudos com maior nível de detalhe. Segundo os autores, a agregação de classes específicas para alguns níveis é desejável, caso houver necessidade. Na Tabela 2 estão listadas as classes deste sistema nos níveis I e II.

**Tabela 2: Chave de Classificação de Uso e Cobertura do Solo**

Nível I	Nível II
1 Terra Urbana ou Construída	11 Residencial
	12 Comercial e Serviços
	13 Industrial
	14 Transportes, Comunicações e Utilidades
	15 Complexos Industriais e Comerciais
	16 Terra Urbana ou Construída Mista
	17 Terra Urbana Diversas ou Construída
2 Terra Agrícola	21 Terra de Cultura e Pastagem
	22 Pomares, Bosques, Vinhedos, Viveiros e Áreas de Horticultura Ornamental
	23 Atividades de Criação Confinada
	24 Outros tipos de Terra Agrícola
3 Pastagem	31 Pastagem Herbácea
	32 Pastagem com Arbusto e Carrasco
	33 Pastagem Mista
4 Terra Florestal	41 Terra de Floresta Decídua
	42 Terra de Floresta Sempre Verde
	43 Terra de Floresta Mista
5 Água	51 Cursos d'água e Canais
	52 Lagos
	53 Reservatórios
	54 Baías e Estuários
6 Terra Úmida	61 Terra Úmida Florestada
	62 Terra Úmida Não Florestada
7 Terra Árida	71 Planícies Salgadas Secas
	72 Praias
	73 Outras Áreas de Areia que não Praias
	74 Rochas Nua Exposta
	75 Minas a céu aberto, Pedreiras e Minas de Cascalho
	76 Áreas de transição
	77 Terra Árida Mista
8 Tundra	81 Tundra de Arbustos e Macega
	82 Tundra Herbácea
	83 Tundra de Solo Nu
	84 Tundra Úmida
	85 Tundra Mista
9 Neve ou Gelo Perene	91 Campos de Neve Perene
	92 Geleiras

Fonte: Anderson *et al.* (1976).

A concepção e os critérios previstos no sistema de classificação de Anderson *et al.* (1976) foram também adotados nos sistemas de classificação produzidos por Cowardin *et al.* (1979) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2006). A chave proposta pelo IBGE (2006) foi adaptada para os padrões e terminologia das classes de UCS que ocorrem no Brasil. Eucalipto e *Pinus*, por exemplo, são considerados como agricultura do tipo silvicultura (Tabela 3). É também muito comum haver a diferenciação entre

culturas temporárias e perenes em censos e caracterização de propriedades rurais. O sistema de classificação elaborado por Cowardin *et al.* (1979) para o *Land Cover Institute* (LCI) do *United States Geological Service* (USGS) diferencia a intensidade da ocupação das áreas urbanas entre áreas de alta e média densidade. No presente estudo, optou-se por fazer uma adaptação a partir das chaves de classificação propostas por Anderson *et al.* (1976), Cowardin *et al.* (1979) e IBGE (2006).

**Tabela 3: Chave de Classificação elaborada por IBGE (2006)**

Nível I CLASSE	Nível II SUBCLASSE
1. Áreas Antrópicas Não-Agrícolas	1.1. Áreas Urbanizadas
	1.2. Áreas de Extração Mineral
2. Áreas Antrópicas Agrícolas	2.1. Cultura Temporária
	2.2. Cultura Permanente
	2.3. Pastagem
	2.4. Silvicultura
3. Áreas de Vegetação Natural	3.1. Floresta
	3.2. Campestre
4. Água	4.1. Corpo d'Água Continental
	4.2. Corpo d'Água Costeiro

Fonte: IBGE, 2006.



A bacia do Fecho do Funil abrange o alto e médio curso do rio Paraopeba e as nascentes estão localizadas no município de Cristiano Ottoni, a 1140 m de altitude. A altitude máxima é de 1615 e a mínima de 721 metros, com uma amplitude altimétrica de 894 metros. A bacia é delimitada a leste pelas bordas do Quadrilátero Ferrífero (Serras da Moeda e Ouro Branco), ao sul, com a Serra das Vertentes, ao norte, com as Serras Azul e dos Três Irmãos e a oeste, com a bacia do rio Pará (Figura 11).

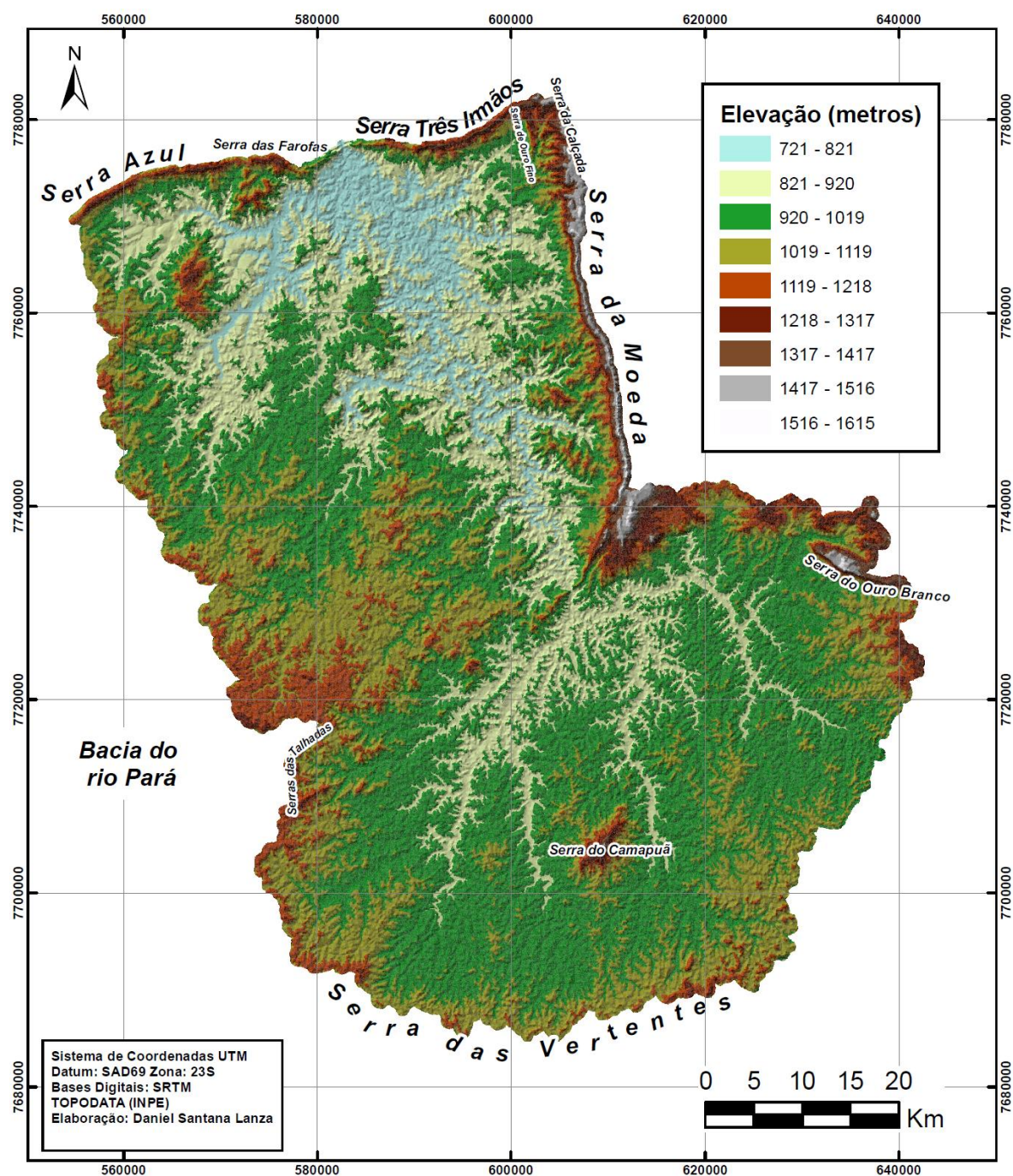
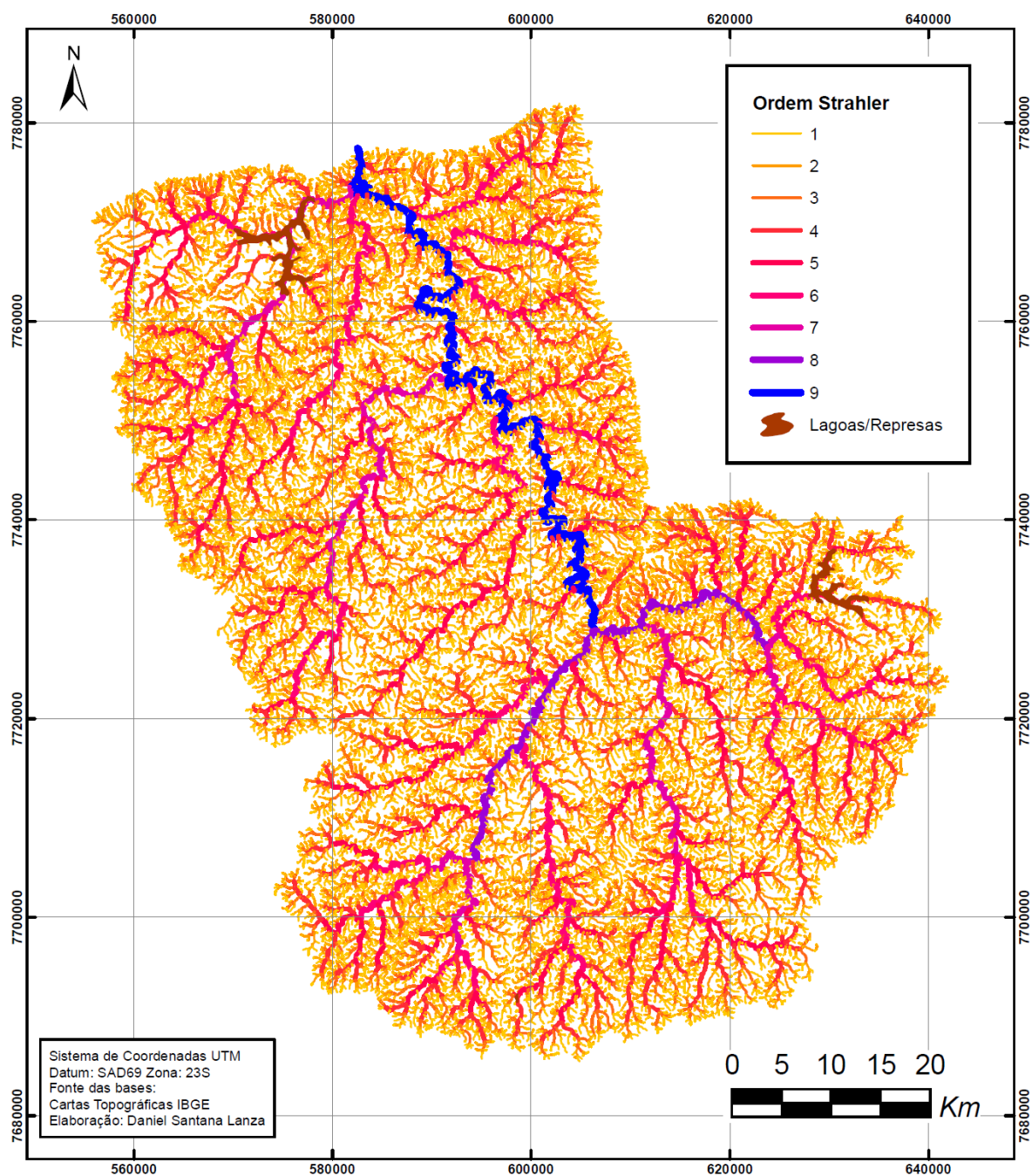


Figura 11: Mapa hipsométrico



A rede de drenagem superficial possui uma densidade de 2,44 km/km<sup>2</sup>. O padrão de drenagem predominante é do tipo dendrítico e os trechos vão até o valor 9 no ordenamento de *Strahler* (Figura 12). A maioria dos cursos d'água é perene, caracterizando uma relativa boa disponibilidade natural de recursos hídricos. Existem dois reservatórios de água (Soledade e Manso) utilizados para geração de energia elétrica e abastecimento público (Figura 13).



**Figura 12:** Ordenamento da drenagem conforme classificação de Strahler

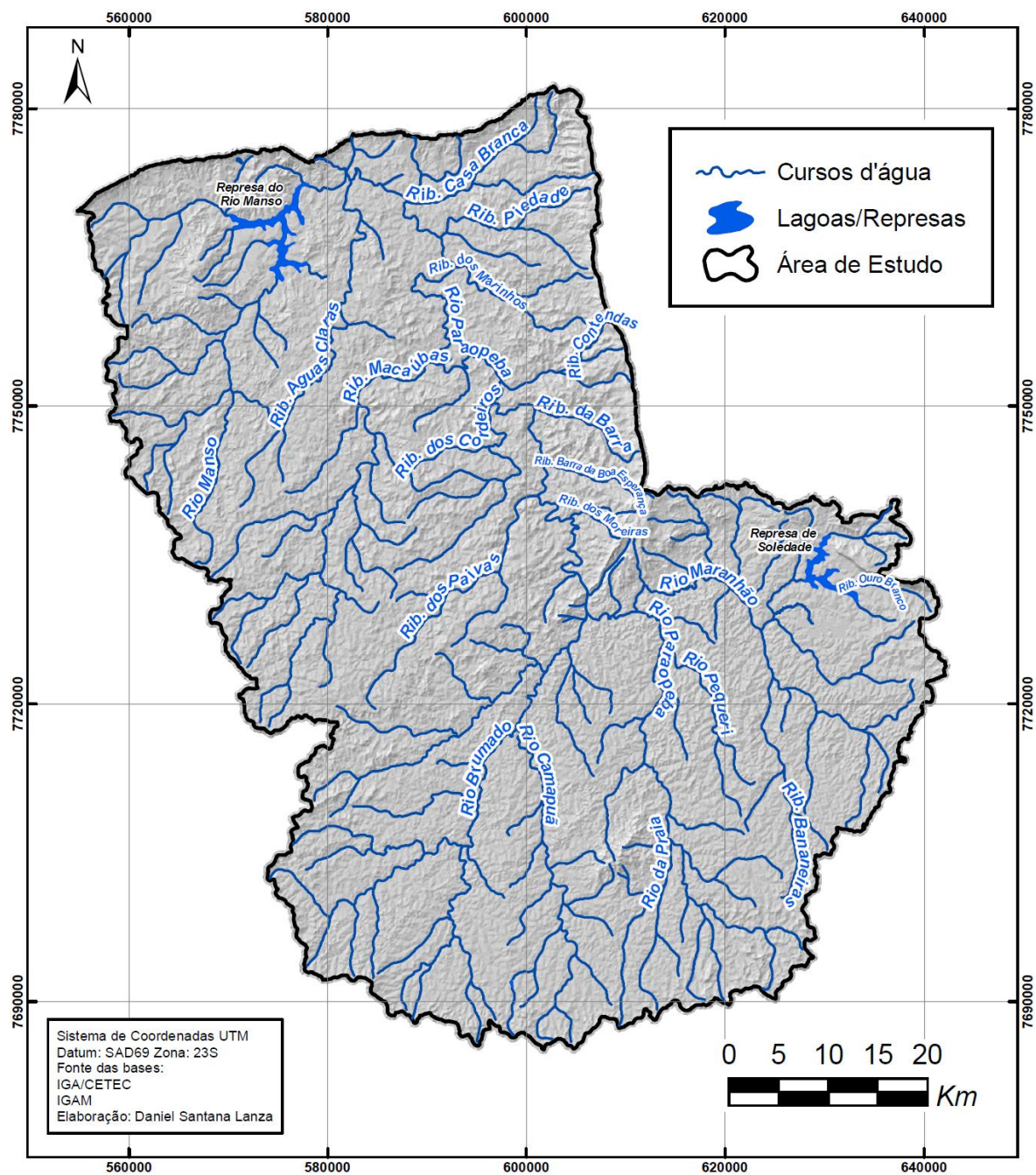


Figura 13: Rede de drenagem com principais rios e ribeirões

### 3.2 Clima

De acordo com a classificação de Köppen, a área de estudo está localizada predominantemente dentro do subtipo climático Cwa (PEEL *et al.*, 2007), e possui

característica dos climas tropicais de altitude, com inverno seco e verão quente. Na classificação com base no índice de umidade de *Thornthwaite* está inserida na zona climática úmida -B2 (CARVALHO *et al.*, 2008).

O relevo exerce forte influência na distribuição da chuva e do clima. Há uma tendência da concentração dos valores mais elevados de precipitação nas áreas de maior altitude, que são os divisores de água. Os locais com maior volume de precipitação anual da bacia estão na extensão das serras da Moeda, Três Irmãos, Serra Azul e na região de Resende Costa e Lagoa Dourada. São áreas que têm índices superiores a 1.500 mm anuais. No vale do rio Paraopeba e nas áreas mais rebaixadas chove menos. Em média, há um excesso hídrico um pouco maior no Médio Paraopeba do que no Alto Paraopeba (Tabela 4).

**Tabela 4: Balanço Hídrico no alto e médio Paraopeba**

<b>ALTO PARAOPEBA</b>	
Total anual de precipitação	<b>1.398,3 mm</b>
Total anual de evapotranspiração real	<b>836,6 mm</b>
Deficiência hídrica	<b>57,9 mm</b>
Excesso hídrico	<b>492,1 mm</b>
Valor do escoamento máximo anual	<b>130,2 mm</b>
Meses mais chuvosos	<b>Out a Mar</b>
Meses mais secos	<b>Abr a Set</b>
<b>MÉDIO PARAOPEBA</b>	
Total anual de precipitação	<b>1.445,1mm</b>
Total anual de evapotranspiração real	<b>865,4mm</b>
Deficiência hídrica	<b>67,1mm</b>
Excesso hídrico	<b>533,3mm</b>
Valor do escoamento máximo anual	<b>143,5mm</b>
Meses mais chuvosos	<b>Out a Mar</b>
Meses mais secos	<b>Abr a Set</b>

Fonte: Almeida (1999)

As chuvas concentram-se no verão e são mais escassas no inverno. O trimestre mais chuvoso é novembro/dezembro/janeiro e o mais seco engloba os meses de junho/julho/agosto (ALMEIDA, 1999). Na bacia do Fecho do Funil a estiagem dura cinco meses, de maio a setembro (Tabela 5). A temperatura média anual aumenta do alto para o baixo da bacia e os valores variam entre 18 e 21°C (Figura 14) (CETEC e IGA, 1996).

Tabela 5: Balanço Hídrico mensal na área de estudo

MÊS											
Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
RETIRADA			..	..	..	..	..	..	..	RETIRADA	
DEFICIÊNCIA			..	..	..	..	..	..	..	DEFICIÊNCIA	
..	..	..	REPOSIÇÃO		..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	EXCESSO					..	..

Fonte: Almeida (1999)

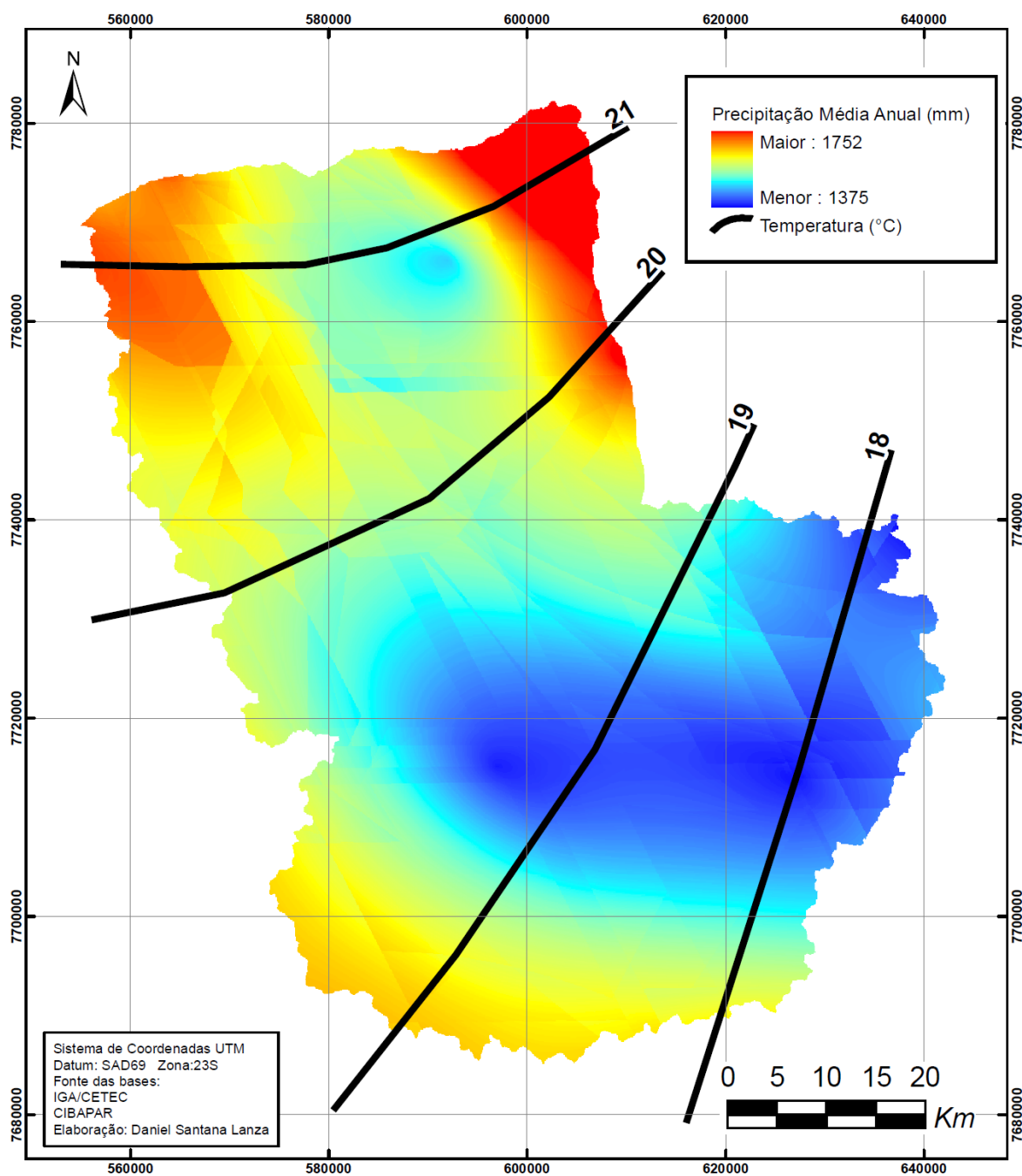


Figura 14: Temperatura e precipitação média anual

### 3.3 Geologia e Geomorfologia

As informações sobre a geologia e geomorfologia da área de estudo foram extraídas principalmente dos estudos da Fundação Centro Tecnológicas de Minas Gerais (CETEC) (1983) e do Instituto de Geociências Aplicadas (IGA) (1996). Na alta e média bacia do rio Paraopeba estão inseridas quatro unidades litoestratigráficas: (i) Complexo Ortognáissico (Embasamento Cristalino), (ii) Supergrupo Rio das Velhas, (iii) Supergrupo Minas, (iv) Depósitos Aluviais (Figura 15).

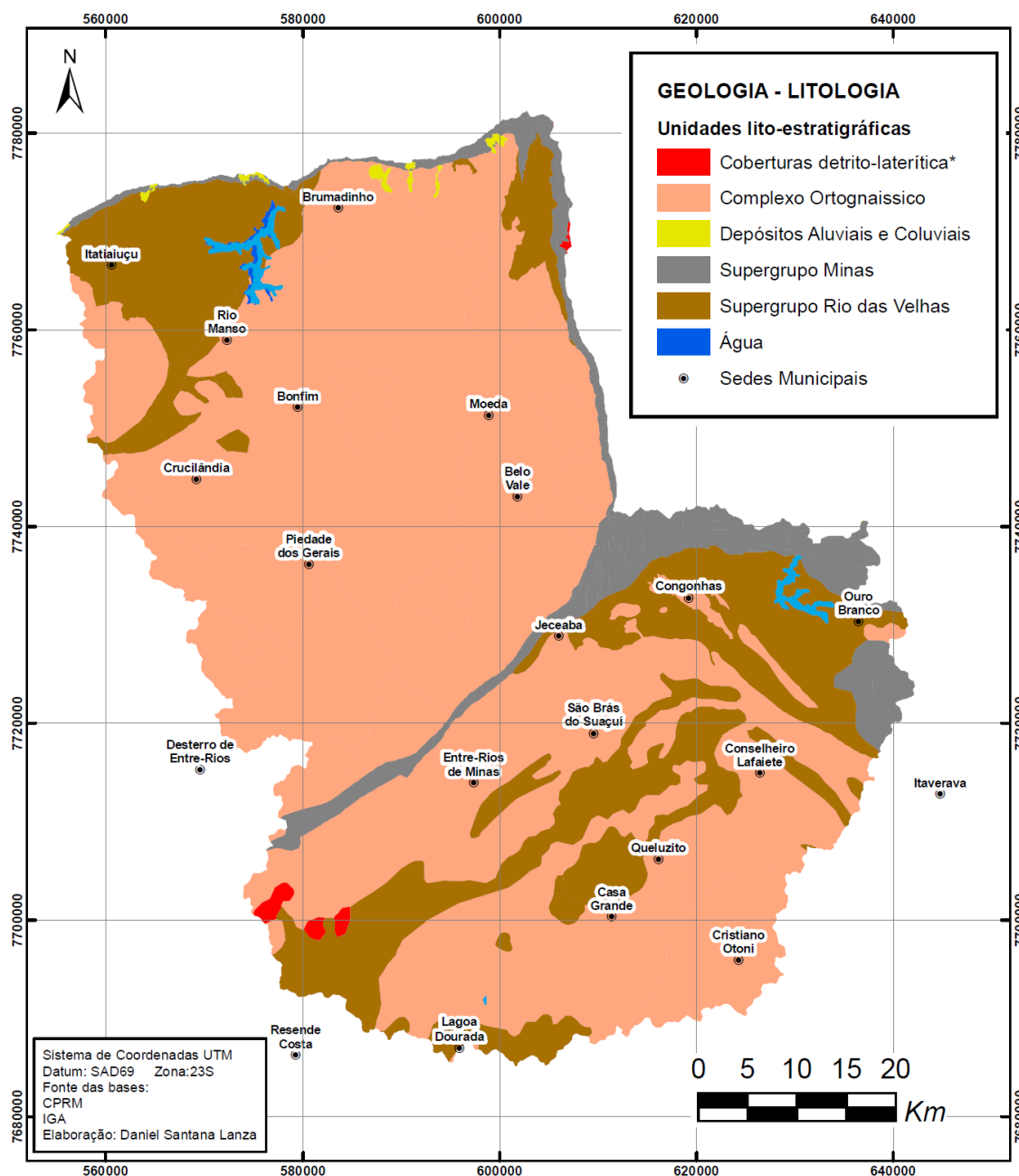


Figura 15: Unidades litoestratigráficas

O Complexo Ortognáissico está presente em grande parte da área de estudo, e o tipo de rocha característica é o granito (cristalina) e o gnaisse (metamórfica), ambos do mesoarqueano. Os principais complexos são: Bonfim, Divinópolis, Belo Horizonte e Lavras. É o tipo litológico predominante na bacia, ocorrendo por toda a sua extensão. O Supergrupo Rio das Velhas é constituído pelos grupos Nova Lima e Maquiné (Formação Santo Amaro). A litologia do Grupo Nova Lima é composta por “xistos metavulcânicos, filitos e xistos metassedimentares, quartzitos e dolomitos em forma de intercalações descontínuas e rochas conglomeráticas em diversos horizontes” (CETEC e IGA, 1996, p. 37). Essas rochas ocorrem descontinuamente no Alto Paraopeba e também nas áreas de contato com o Quadrilátero Ferrífero. O Supergrupo Minas é representado principalmente pelo Grupo Itabira que, por sua vez, é dividido nas formações Cauê e Gandarela. A formação Cauê é representada por itabiritos dolomíticos e subordinadamente filitos e dolomitos. A formação Gandarela é constituída principalmente por dolomitos. Toda a região do Quadrilátero Ferrífero possui a geologia bastante complexa e diversificada. Segundo a Companhia Mineradora de Minas Gerais (COMIG) (2003), ainda ocorrem filitos, dolomitos, xistos, itabiritos e quartzitos, pertencentes aos Grupos Caraça, Piracicaba, Itabira e Itacolomi.

O relevo é bastante acidentado em grande parte da bacia. É possível observar (Figura 16) que predominam os relevos ondulados ou forte ondulados. A declividade média considerando toda a extensão territorial é de 17%. As declividades mais altas estão nas serras do Quadrilátero Ferrífero, em que os valores vão de 45% a mais de 100%. Isso configura um relevo montanhoso e escarpado nesses locais. As áreas mais planas são localizadas nas planícies aluviais dos principais rios e ribeirões. As macrounidades de relevo na área de estudo do rio Paraopeba são divididas em: (i) Planaltos Dissecados do Centro-Sul e do Leste de Minas, (ii) Quadrilátero Ferrífero, (iii) Planaltos do São Francisco, e (iv) Depressão Sanfranciscana (Figura 17).

A unidade Planaltos Dissecados ocupa a maior porção da área de estudo. Inicia-se nas cabeceiras da bacia do rio Paraopeba e vai até o alinhamento da Serra Três Irmãos e Serra Azul. É caracterizada pelo domínio de cristas e colinas elevadas, elaboradas sobre rochas predominantemente granito-gnáissicas. A dissecção fluvial originou um relevo com vertentes ravinadas e incisão de vales em V, com predominância de colinas côncavo-convexas. A associação de colinas e cristas está predominantemente ligada à ocorrência de

rochas xistosa do Grupo Nova Lima. Entre os rios Camapuã e Maranhão, ocorre uma área rebaixada com a presença de colinas esculpidas sobre rochas do embasamento, que se correlacionam topograficamente com a Depressão Sanfranciscana. Esse rebaixamento está associado à erosão diferencial entre rochas graníticas e granitóides, e xistos do Grupo Nova Lima.

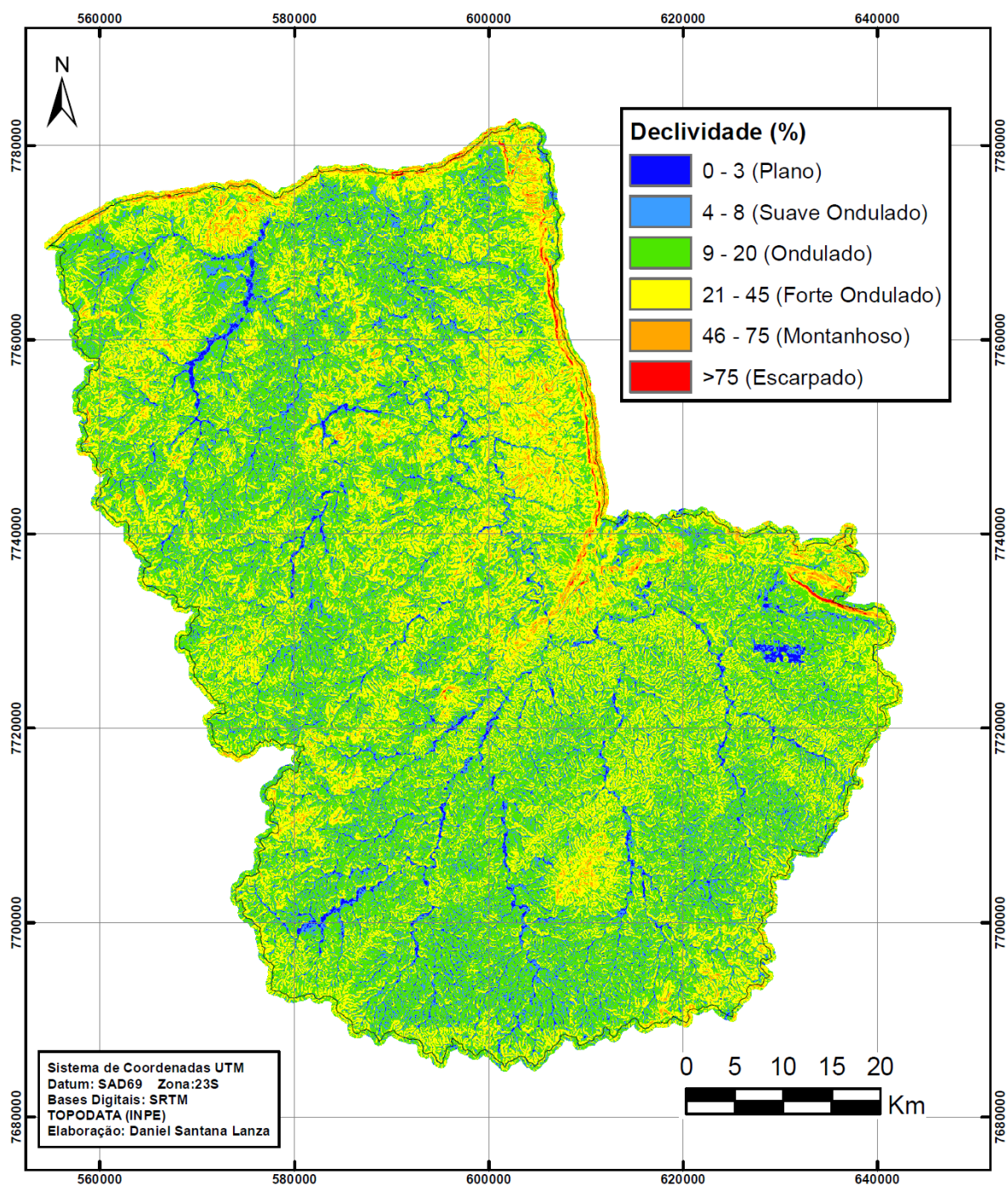


Figura 16: Mapa de declividade

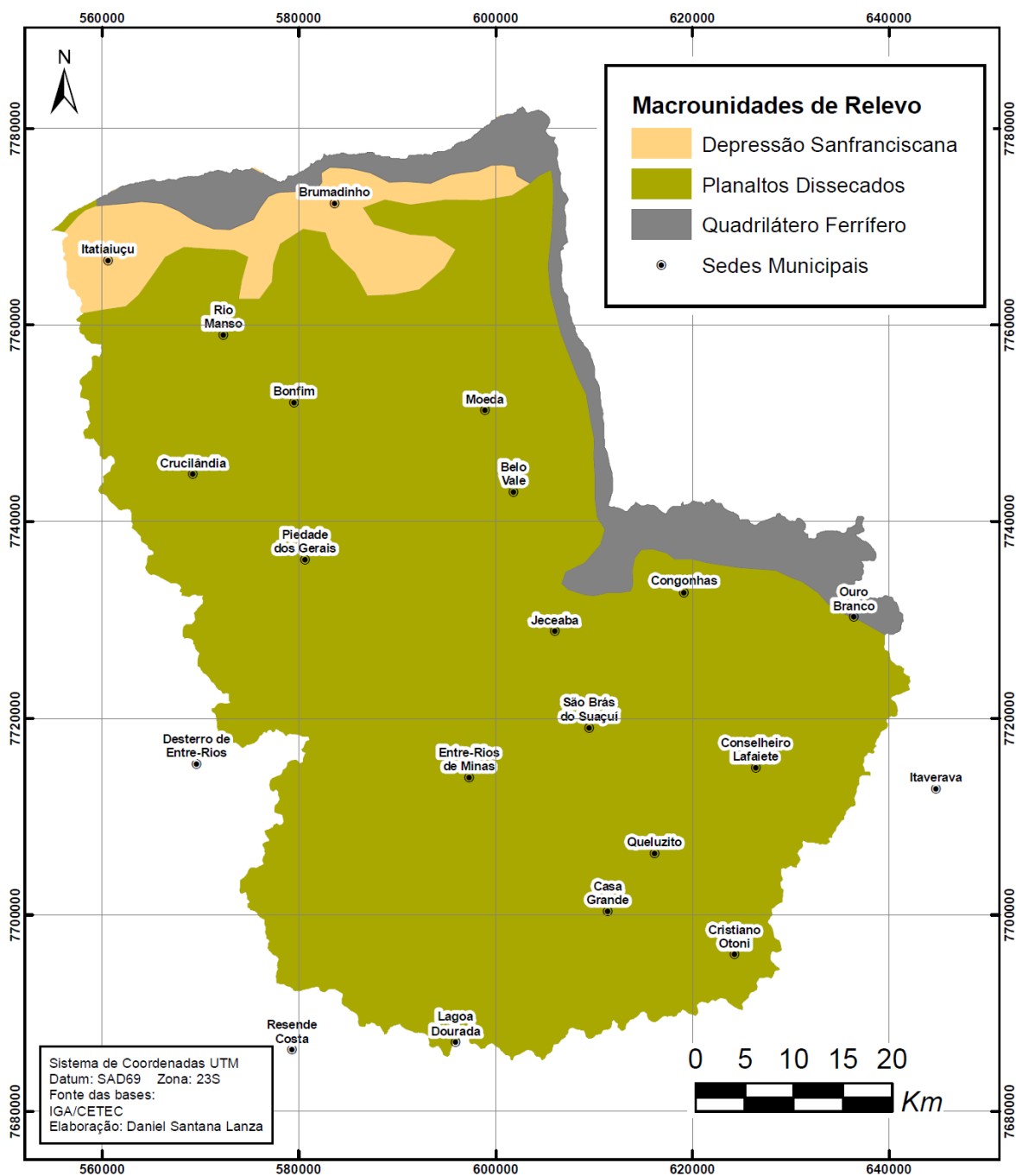


Figura 17: Mapa das macrounidades de relevo

A propensão à erosão acelerada nos planaltos dissecados foi correlacionada de forma sintética com a litologia e as formas do relevo por Oliveira *et al.* (1978) (Tabela 6). Nesse estudo, os autores ressaltam que as camadas superficiais do solo já foram removidas em grandes extensões, sobretudo em decorrência de erosão em lençol. A erosão laminar acelerada nessa unidade de relevo é fruto das características do meio físico e da ausência de medidas de controle e prevenção da erosão pelos agricultores.



**Tabela 6: Propensão à erosão acelerada nos Planaltos Dissecados**

<b>TIPOLOGIA</b>	<b>FORMAS DE RELEVO</b>	<b>PROPENSÃO À EROSÃO ACELERADA</b>
Granito/gnaisses	Colinas	Alta, com predomínio de voçorocas e erosão em lençol.
	Colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados	Idem
	Colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados; Cristas esparsas.	Média, com diferentes tipos de ocorrência.
Xistos/filitos	Cristas com vertentes ravinadas e vales encaixados	Média, com predomínio de erosão em lençol e ravinamento.
	Colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados	Alta, com predomínio de voçorocas e erosão em lençol.

Fonte: Oliveira *et al.* (1978).

O Quadrilátero Ferrífero constitui uma grande unidade morfoestrutural onde as formas de relevo são condicionadas principalmente pela erosão diferencial (BARBOSA e RODRIGUES, 1967). É representado por cristas estruturais, escarpas e vertentes íngremes com declividades superiores a 45%. As cristas são alinhadas em dois sentidos: no sentido E-W ocorre a Serra Azul (1360m) e a Serra dos Três Irmãos (1380m), e no sentido N-S a Serra da Moeda (1250 a 1500m). Esta última corresponde a um relevo estrutural invertido do tipo “sinclinal suspenso”. As rochas predominantes no Quadrilátero Ferrífero, na bacia do rio Paraopeba, são do Supergrupo Minas, que é constituído de itabiritos, dolomitos ferruginosos e afloramentos quartzíticos. Este material resistente é que propicia a erosão diferencial, devido ao contato com outras rochas mais frágeis do Supergrupo Rio das Velhas (xistos e filitos) e do Embasamento Cristalino (granito-gnaisse). Por isso, as áreas sobre rochas itabiríticas ocupam posição de destaque e constituem as cristas das serras da região (VARAJÃO *et al.*, 2009). De acordo com Salgado *et al.* (2007), embora sejam resistentes ao rebaixamento, apresentam certa fragilidade quanto ao recuo lateral das escarpas, o que pode estar associado ao contato das rochas resistentes com as frágeis que constituem a base dessas escarpas.

Sob a ótica da erosão acelerada, Oliveira *et al.* (1978) identificaram que os focos de erosão são mais frequentes em vertentes instaladas sobre xistos e filitos do que sobre itabiritos e

quartzitos. Nos itabiritos, ocorre a formação de cangas ferruginosas bastantes resistentes à erosão. Na Tabela 7, os autores sintetizaram a propensão à erosão acelerada no Quadrilátero Ferrífero da seguinte forma:

**Tabela 7: Propensão à erosão acelerada no Quadrilátero Ferrífero**

<b>TIPOLOGIA</b>	<b>FORMAS DE RELEVO</b>	<b>PROPENSÃO À EROSÃO ACELERADA</b>
Itabiritos (e cangas), quartzitos, filitos e quartzitos ferruginosos.	Cristas	Baixa
Canga (predominante), depósitos colúvio-lacustres, quartzitos.	Superfície ondulada	Baixa
Xisto/Filito	Colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados	Alta propensão à erosão acelerada com predomínio de voçorocas e erosão em lençol
	Colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados, cristas esparsas.	Média propensão à erosão acelerada, com diferentes tipos de ocorrência.

Fonte: Oliveira *et al.* (1978).

A Depressão Sanfranciscana é uma denominação genérica de uma superfície rebaixada ao longo do rio São Francisco e dos principais afluentes. Estende-se ao longo do rio Paraopeba e afluentes, principalmente no Baixo Paraopeba. Essa unidade geomorfológica faz parte de uma extensa superfície de aplainamento atribuída ao Terciário Superior, e possui cotas altimétricas entre 650 e 850m. Na área de estudo, a Depressão Sanfranciscana ocorre em área rebaixadas no contato com os Planaltos Dissecados e Quadrilátero Ferrífero. A delimitação da Depressão nesta área foi feita por critérios essencialmente topográficos, já que esse rebaixamento se efetuou em rochas do Grupo Bambuí e também do Embasamento Cristalino.

### 3.4 Pedologia

O mapa de solos com maior nível de detalhe existente para a área de estudo foi elaborado em nível de reconhecimento, na escala de 1:250.000 (Figura 18 e Tabela 8). Considerando o segundo nível categórico de classificação, há a ocorrência de seis classes de solos (CETEC, 1983; EMBRAPA, 2006):

Os Neossolos Flúvicos (RY) são solos derivados de sedimentos aluviais. Apresentam horizonte “A” diferenciado, seguido de camadas estratificadas de distribuição não-uniforme de carbono e/ou composição granulométrica. Ocorrem próximos à drenagem e a granulometria pode variar muito em cada camada. Os solos aluviais têm um papel importante por terem boa disponibilidade de água, e por isso são bastante utilizados na agricultura. A limitação de uso desses solos para determinadas culturas é condicionada pelo excesso de água. Outro conflito no uso desses solos é devido ao fato de a vegetação das áreas ribeirinhas serem protegidas pelo Código Florestal, Lei n. 4771/65 (BRASIL, 1965).

Os Neossolos Litólicos (RL) são pouco desenvolvidos com o horizonte “A” sobre: (i) a rocha ou (ii) horizonte “C” ou (iii) material com 90% ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha. São solos jovens e rasos onde a espessura de A+C deve ser inferior a 50 cm. Estes solos apresentam normalmente pedregosidade, cascalhos e concreções, sendo que as características estão relacionadas com a natureza do material originário. Ocorrem em áreas de relevo muito acidentado onde a erosão é muito maior do que a pedogênese. Na área de estudo, estão instalados sobre as rochas do Quadrilátero Ferrífero e também na Serra do Camapuã. Em muitos locais ocorrem principalmente ao lado dos Cambissolos. São solos suscetíveis à erosão acelerada por serem rasos e terem saturação rápida de água, o que favorece o escoamento superficial. O processo é agravado quando constituídos predominantemente de material siltoso e arenoso. Quando instalados sobre itabiritos, apresentam resistência devido às concreções ferruginosas (cangas). Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2004), apesar de a canga ser um material muito duro e de baixa erodibilidade, é importante manter essas áreas protegidas com cobertura de vegetação porque o material subjacente apresenta baixa resistência.

Latosolos Vermelhos (LV) e Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) são solos que apresentam horizonte “B” latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte “A”. São bastante desenvolvidos e espessos, sendo muito antigos ou que se desenvolveram em material fortemente intemperizado. As partículas de silte e argila são bastante agregadas fazendo com que estes solos sejam arejados, friáveis e bem drenados. São resistentes à erosão. Porém são bastante lixiviados e deficientes em nutrientes. Estão associados aos Cambissolos e Argissolos e predominantemente localizados nas regiões de Brumadinho, Rio Manso, Bonfim e Crucilândia (Médio Paraopeba) e São Brás do Suaçuí e Congonhas (Alto Paraopeba). Ocorrem sobre rochas do Embasamento Cristalino (granito e gnaisse) e do Supergrupo Rio das Velhas (xistos e filitos). As principais limitações ao seu pleno aproveitamento são a baixa fertilidade e a presença de alumínio, tóxico para as plantas. Necessitam de uso de fertilizantes e corretivos e apresentam potencial para a mecanização.

Os Cambissolos Háplicos (CX) possuem horizonte “B” incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial. Apresentam grande variação de profundidade e demais características (IBGE, 2007). São parecidos com os Latossolos, devido principalmente à pequena diferenciação dos horizontes. Porém, os Latossolos são mais desenvolvidos do que os Cambissolos que, na área de estudo, são considerados um rejuvenescimento dos primeiros. Devido ao baixo grau de desenvolvimento pedogenético, as características dos solos são bastante condicionadas pelo material de origem. Esse é o tipo de solo com maior propensão à erosão na área de estudo.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA) são caracterizados pela presença de horizonte “B” textural imediatamente abaixo do “A” ou “E”. São formados por podzolização com movimentação de argila para o horizonte “B”. A água infiltra com boa velocidade em “A” mas tem dificuldade para infiltrar em “B” devido ao entupimento dos poros. Isso favorece o escoamento superficial e torna este solo bastante suscetível à erosão. O risco de erosão aumenta quanto maior for a diferença textural (caráter abrupto). Na área de estudo, estão localizados nas sub-bacias do leste (margem direita do rio Paraopeba), nos municípios de Belo Vale, Brumadinho e Moeda, e também nas regiões de Entre-Rios de Minas e Rio Manso. Estão associados aos Latossolos e Cambissolos.

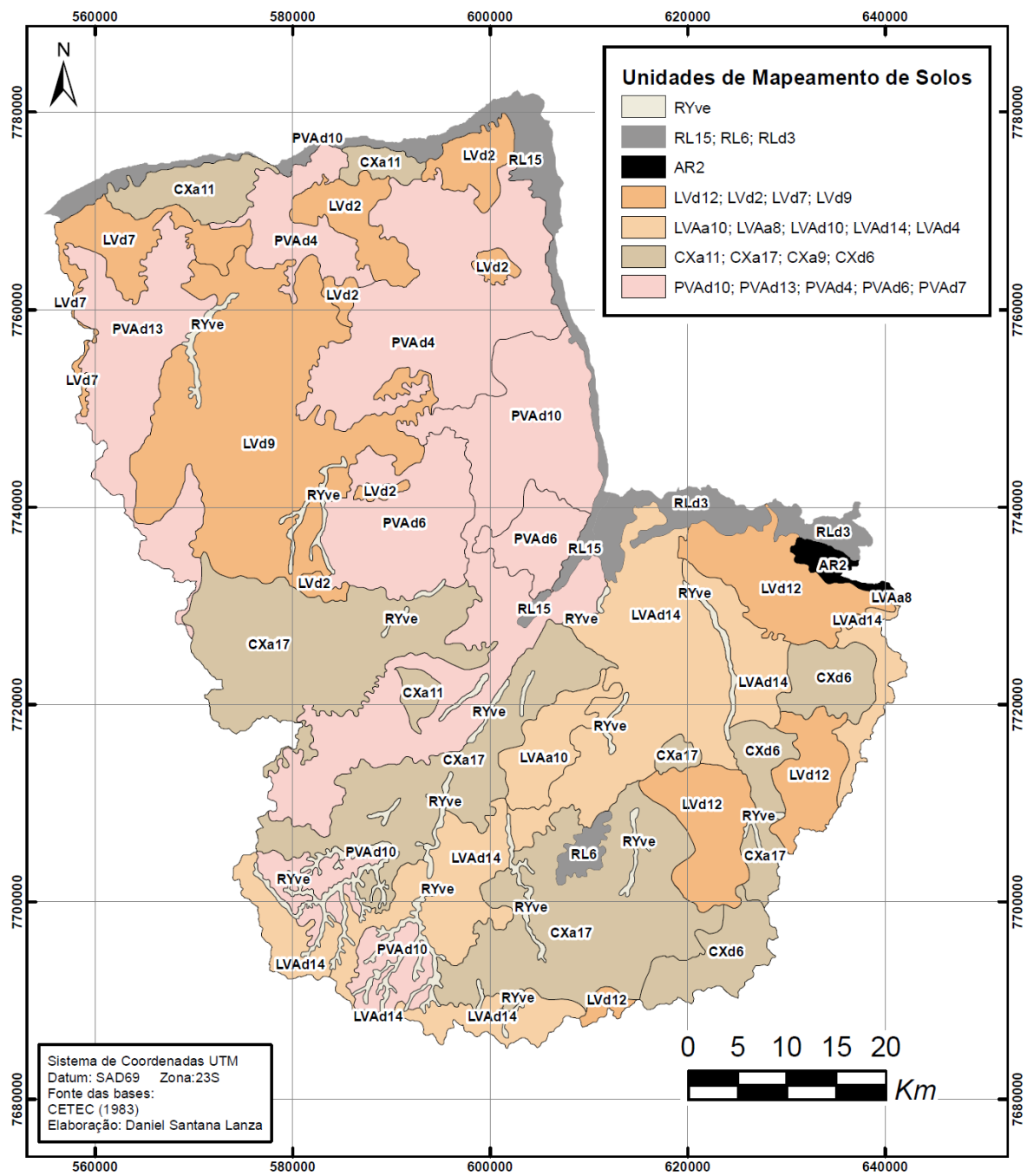


Figura 18: Mapa de solos

**Tabela 8: Detalhamento das classes de solos**

<b>CÓD.</b>	<b>CLASSE</b>
<b>RYve</b>	NEOSSOLOS FLÚVICOS Eutróficos "A" moderado textura indiscriminada fase floresta perenifólia de várzea mais Solos HIDROMÓRFICOS INDISCRIMINADOS fase campos de várzea, ambos relevos planos (60-40%)
<b>RL6</b>	NEOSSOLOS LITÓLICOS "A" fraco textura indiscriminada mais Cambissolos Háplicos "A" moderado alumínico textura argilosa fase campo cerrado relevo forte ondulado e montanhoso (70-30%)
<b>RL15</b>	NEOSSOLOS LITÓLICOS relevo montanhoso mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS relevo forte ondulado alumínico "A" moderado textura indiscriminada fase campo cerrado mais Afloramento de Rochas (40-30-30%)
<b>RLd3</b>	NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos "A" moderado textura indiscriminada fase cerrado relevo forte ondulado e montanhoso
<b>AR2</b>	Afloramento de Rochas mais NEOSSOLOS LITÓLICOS A fraca textura arenosa fase pedregosa, cerrado, relevo montanhoso (70-30%).
<b>LVd2</b>	LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos "A" moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo ondulado
<b>LVd7</b>	LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos "A" moderado textura argilosa fase cerrado relevo ondulado e suave ondulado
<b>LVd9</b>	LATOSSOLOS VERMELHOS mais ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS ambos Distróficos "A" moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo ondulado (60-40%)
<b>LVd12</b>	LATOSSOLOS VERMELHOS mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS ambos Distróficos "A" moderado textura argilosa fase cerrado/floresta subperenifólia relevo ondulado (70-30%)
<b>LVAa8</b>	LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS textura argilosa mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS textura siltosa ambos Alumínicos "A" moderado fase floresta subperenifólia relevo forte ondulado e montanhoso (60-40%)
<b>LVAa10</b>	LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS ambos Alumínicos "A" moderado textura argilosa fase cerrado relevo ondulado (70-30%)
<b>CXa11</b>	CAMBISSOLOS HÁPLICOS Alumínicos textura argilosa mais NEOSSOLOS LITÓLICOS textura indiscriminada ambos "A" moderado fase campo cerrado relevo forte ondulado (60-40%)
<b>CXa17</b>	CAMBISSOLOS HÁPLICOS mais ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS mais LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS todos Alumínicos "A" moderado textura argilosa fase cerrado relevo ondulado (40-30-30%)
<b>CXd6</b>	CAMBISSOLOS HÁPLICOS mais ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS ambos Distróficos "A" textura argilosa fase cerrado/floresta subperenifólia relevo ondulado e forte ondulado (60-40%)
<b>PVAd4</b>	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos "A" moderado textura argilosa fase cerrado/floresta subperenifólia relevo ondulado e forte ondulado
<b>PVAd6</b>	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS mais LATOSSOLOS VERMELHOS ambos Distróficos "A" moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia relevo ondulado (60-40%)
<b>PVAd10</b>	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS relevo forte ondulado mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS relevo ondulado ambos Distróficos "A" moderado textura argilosa fase floresta subperenifólia (60-40%)
<b>PVAd13</b>	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS mais CAMBISSOLOS HÁPLICOS mais NEOSSOLOS LITÓLICOS todos Distróficos "A" moderado textura argilosa fase cerrado/floresta subperenifólia relevo forte ondulado (40-30-30%)

Fonte: Adaptado de CETEC (1983)

### 3.5. Vegetação

A bacia de estudo está inserida na área de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado (IBGE, 2004), sendo que o primeiro é predominante, e o segundo ocorre principalmente nas altitudes mais elevadas e sobre solos rasos e/ou pedregosos. A vegetação natural na bacia está bastante alterada devido à ocupação humana ao longo dos séculos. As áreas mais preservadas estão localizadas nas unidades de conservação e nas altitudes elevadas, onde o relevo acidentado e o solo com baixa aptidão agrícola não favorecem a prática de atividades agropastoris.

A vegetação florestal é constituída principalmente por remanescentes da Floresta Estacional Semidecidual Montana e se encontra em diferentes estágios de preservação. Ocorrem em fragmentos isolados sob a forma de capões de mata, capoeiras<sup>9</sup> e matas ciliares em toda a extensão da bacia. A Floresta Estacional Semidecidual Montana é um tipo de vegetação mesófila, condicionada pela dupla estacionalidade climática, com chuvas intensas de verão seguidas de estiagem acentuada. Segundo o IBGE (1992), ocorrem acima dos 500 metros de altitude e entre 20 a 50% das árvores perdem as folhas no período seco. Esse tipo de vegetação apresenta indivíduos com alturas variadas que podem alcançar até 20 metros. As espécies mais comuns são: embaúba, jacarandá, carne-de-vaca, jatobá, sucupira, quaresmeira e ipê (IGA e CETEC, 1996).

A ocorrência de vegetação do Cerrado na área de estudo é bastante influenciada pelos efeitos da altitude, solos e geologia. As seguintes variações do cerrado foram identificadas: campo cerrado e campo limpo (ou campo rupestre). O primeiro ocorre nas médias vertentes, nas quais a vegetação arbórea vai se tornando mais rala na medida em que a altitude aumenta. Nas áreas mais elevadas sobre solos litólicos e afloramentos rochosos há um predomínio de espécies herbáceas e arbustivas. Segundo Rizzini (1997), essas formações campestres do cerrado, destituídas de árvores, são denominadas de campo

---

<sup>9</sup> A capoeira é uma formação secundária que apresenta grandes variações nos aspectos de porte e diâmetro das árvores. Corresponde a quarta fase da sucessão natural e os indivíduos chegam até 5 metros. Este estágio sucessional pode ser identificado em imagens do sensoriamento remoto em escala de 1:100.000 (VELOSO, 1991).

limpo. Na área de estudo possuem dois subtipos: campo ferruginoso sobre as cangas e campo quartzítico sobre os quartzitos.

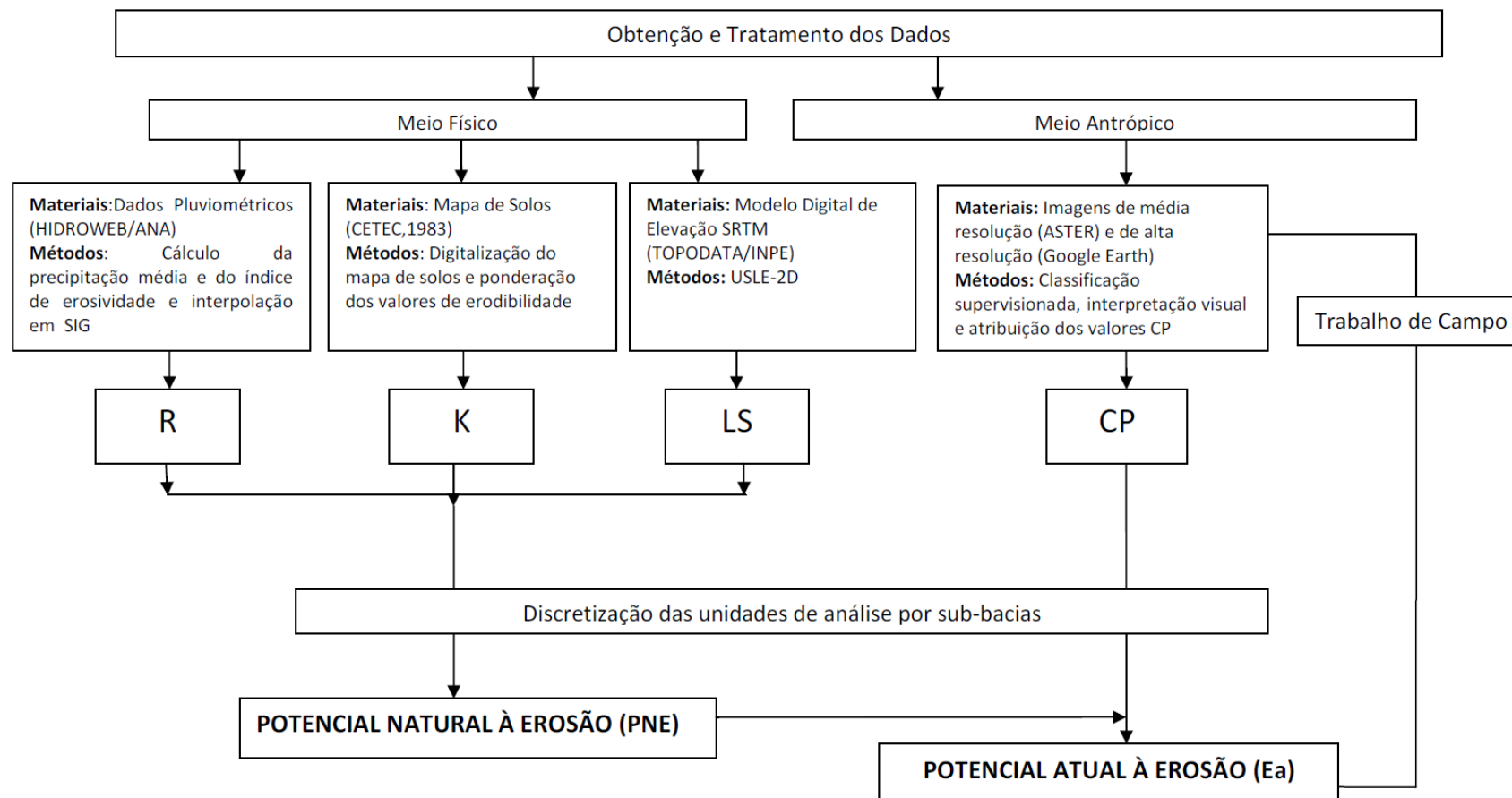


## CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização deste estudo apoiou-se na utilização de materiais de diversas fontes, que se tornaram acessíveis principalmente a partir da última década. Essa facilidade na aquisição de dados em meio digital viabiliza a execução de trabalhos que envolvem uma grande quantidade de informações, traduzindo em um avanço para as ciências ambientais aplicadas.

Os dados utilizados na pesquisa foram: (i) arquivos temáticos e mapas da área de estudo; (ii) imagens multiespectrais do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e de alta resolução (Google Earth<sup>®</sup>); (iii) Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM); (iv) dados pluviométricos adquiridos no site da Agência Nacional de Águas (ANA); (v) mapa de solos (CETEC, 1983) e dados de erodibilidade dos solos (CHAVES, 1994); e (vi) dados coletados em campo por meio de um GPS.

O fluxograma na Figura 19 exemplifica os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção de cada um dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), e para a modelagem do potencial à erosão laminar. Os resultados foram analisados considerando a influência do meio físico, que resulta no Potencial Natural à Erosão (PNE), e do meio antrópico, por meio do Potencial Atual à Erosão (Ea). A área de estudo foi dividida em 17 unidades de análise (sub-bacias) e agrupada em 02 regiões (Alto e Médio Paraopeba). Mapas de focos de erosão acelerada, geológicos, pedológicos, geomorfológicos, imagens de alta resolução (Google Earth<sup>®</sup>), e observações de campo também subsidiaram a análise e discussão dos resultados.



**Figura 19:** Fluxograma dos procedimentos metodológicos

#### 4.1. Dados pluviométricos e fator de erosividade (R)

Para a obtenção do fator de erosividade foram realizados os seguintes procedimentos:

- aquisição dos dados de pluviometria;
- seleção dos dados consistidos das estações com série histórica de, no mínimo, 20 anos, no período entre 1971 e 2005;
- cálculo da média mensal e anual de precipitação;
- cálculo do fator de erosividade utilizando formulações matemáticas ajustadas para a região;
- interpolação dos dados de erosividade em SIG.

A erosividade da chuva da área de estudo foi calculada utilizando os dados consistidos de 34 estações de monitoramento de pluviometria (Figura 20 e Tabela 9). Os arquivos foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (HIDROWEB/ANA). Após análise preliminar dos dados, foram selecionados os registros pluviométricos das estações que possuem uma série histórica de no mínimo 20 anos, no período entre 1971 e 2005. Somente uma estação possui dados com série histórica com menos de 20 anos (18 anos) (código 2043005). Foi então calculada a média mensal e anual de chuva para cada uma das localidades.

A erosividade mensal foi calculada na forma do índice  $EI_{30}$  através das formulações matemáticas ajustadas para as regiões de Sete Lagoas (MARQUES *et al.*, 1998) e Lavras (VAL, 1985), representada pela Equação 4. Essas duas equações foram utilizadas por Mello *et al.* (2007) para as regiões Campo das Vertentes e Alto São Francisco, com clima Cwa/Aw. O mesmo procedimento realizado pelo autor foi adotado neste trabalho pelo fato de a área de estudo estar inserida no mesmo contexto regional e climático do Campo das Vertentes/Alto São Francisco. Os dados foram interpolados por *krigagem*<sup>10</sup>, utilizando o *software* ArcGIS 9.3<sup>®</sup>.

---

<sup>10</sup> Krigagem é uma predição linear ou uma forma de inferência bayesiana que leva em consideração: o número de amostras utilizadas, as posições das amostras na área a ser avaliada, as distâncias entre as amostras e a zona a ser estimada, e a continuidade espacial da variável em estudo (ANDRIOTTI, 2003).

$$EI_{30} = \frac{(13,37 + 0,39p + 0,04p^2 - 7,92 \times 10^{-5} p^3) + \left(125,92 * \left(\frac{p^2}{P}\right)^{0,603}\right)}{2} \quad (4)$$

Onde:

p = precipitação média mensal (mm);

P = precipitação média anual (mm).

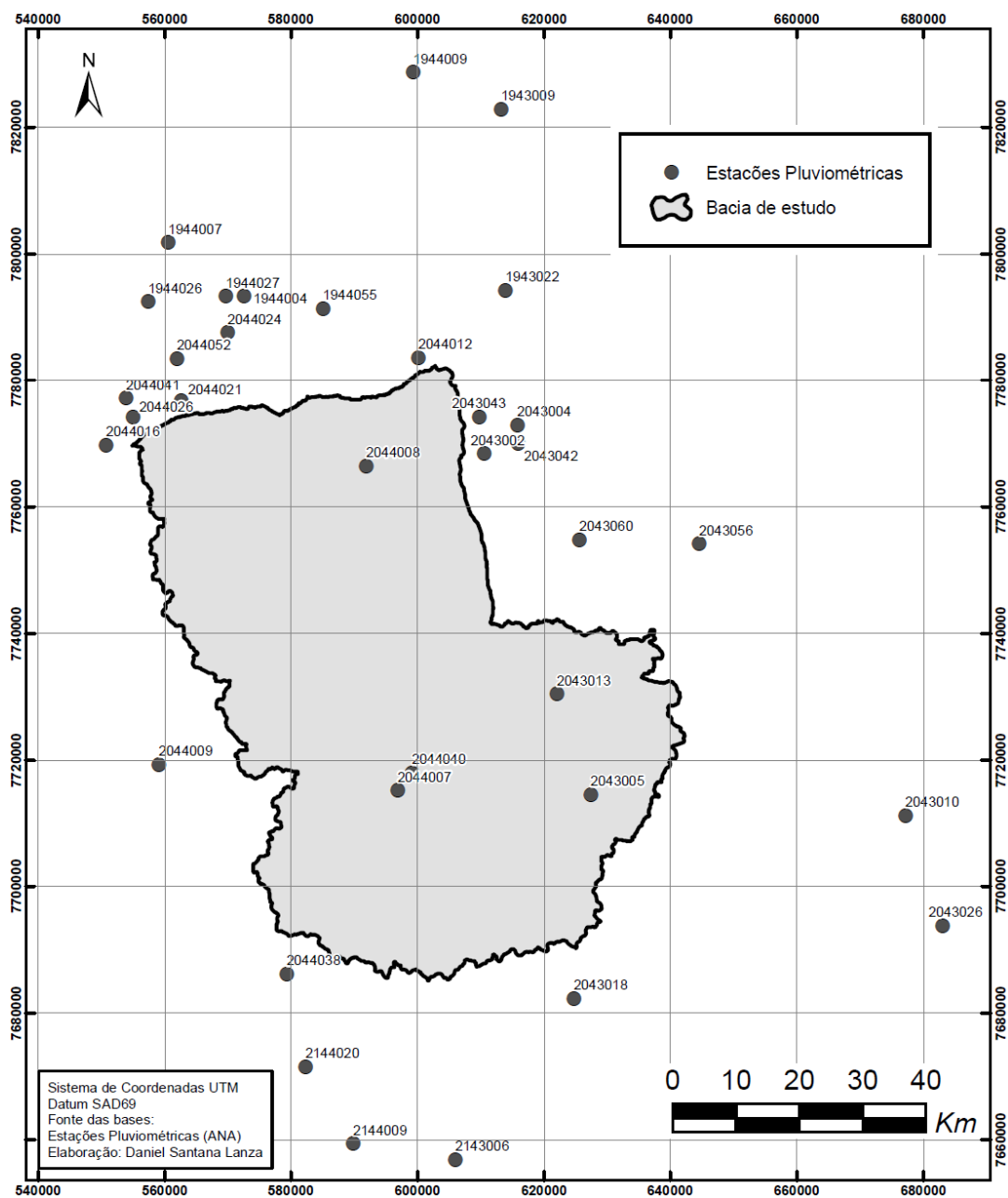


Figura 20: Localização das estações pluviométricas

**Tabela 9: Série histórica dos dados pluviométricos.**

COD.	ESTAÇÃO	Série Histórica																																			TOTAL ANOS	
		71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	0	1	2	3	4	5		
1944004	Ponte Nova do Paraopeba																																					35
1944026	Barro Preto																																					35
1944027	Juatuba																																				31	
1944055	Betim																																				26	
2043002	Lagoa Grande (MMV)																																				35	
2043005	Conselheiro Lafaiete*																																				18	
2043013	Congonhas - Linigrafo																																				33	
2043018	Carandai																																				26	
2043043	Represa do Miguelão																																				29	
2043056	Faz. Água Limpa- Jusante																																				20	
2043060	Itabirito																																				20	
2044007	Entre Rios de Minas																																				35	
2044008	Melo Franco																																				25	
2044009	Fazenda Campo Grande																																				35	
2044012	Ibirité																																				35	
2044016	Fazenda Benedito Chaves																																				35	
2044021	Alto da Boa Vista																																				33	
2044024	Fazenda Curralinho																																				33	
2044026	Fazenda Coqueiros																																				30	
2044038	Resende Costa																																				24	
2044040	Usina João Ribeiro																																				32	
2044041	Fazenda Laranjeiras																																				29	
2044052	Jardim																																				23	
2143006	Barroso																																				29	
2144009	Porto do Elvas																																				27	
2144020	Usina São João Del Rei																																				29	
2043010	Piranga																																				34	
2043026	Braz Pires																																				33	
1944007	Fazenda Escola Florestal																																				35	
1943009	Vespasiano																																				35	
1943022	Caixa de Areia																																				35	
1944009	Pedro Leopoldo																																				35	
2043004	Rio do Peixe																																				34	
2043042	Represa das Codornas																																				29	

\* Para a estação de Conselheiro Lafaiete foram utilizados dados do período entre 1966 e 1970 para completar falhas na série histórica.

## 4.2. Mapa de solos e fator de erodibilidade (K)

Para a obtenção do fator de erodibilidade dos solos foram realizados os seguintes procedimentos:

- compilação de mapas de solos da alta e média bacia do rio Paraopeba;
- digitalização do mapa de solos em escala de 1:250.000;
- adequação ao novo sistema de classificação;
- levantamento de dados de erodibilidade das classes de solos com ocorrência na área de estudo;
- confecção da camada de erodibilidade em SIG.

A preparação do mapa de solos foi feita por meio da vetorização do mapeamento de solos do CETEC (1983), em escala de 1:250.000. O arquivo em formato TIFF foi georeferenciado através da utilização das coordenadas da grade. O Sistema de coordenadas original é lat/long (geográficas), sendo que, após a vetorização, o arquivo foi transformado para UTM *datum* SAD69. O mapa foi adaptado ao novo sistema brasileiro de classificação de solos e definido no segundo nível categórico (EMBRAPA, 2006).

Os valores de erodibilidade foram adquiridos a partir do estudo de Chaves (1994) (Tabela 10), que desenvolveu um modelo de regressão a partir de dados de K obtidos por Denardin (1990). Ele desenvolveu uma equação geral para solos do Brasil, porém Chaves (1994) utilizou a mesma abordagem para os solos que ocorrem apenas na bacia no rio São Francisco. Segundo o autor, esta regionalização possibilitou a obtenção de melhores coeficientes de determinação para a equação. As variáveis independentes utilizadas na análise de regressão foram: silte do solo (%), óxido de alumínio extraível por ataque sulfúrico (%), carbono orgânico (%), óxido de ferro extraível por ataque sulfúrico (%) e óxido de silício extraível por ataque sulfúrico. Os valores obtidos pelo autor foram ponderados para as unidades de mapeamento de solos com ocorrência na bacia de estudo.

**Tabela 10: Erodibilidade das classes de solos de ocorrência na área de estudo**

CLASSES DE SOLOS	ERODIBILIDADE (K) (Mg h MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )
AFLORAMENTO DE ROCHAS	0
NEOSSOLOS FLÚVICOS	0,047
SOLOS HIDROMÓRFICOS	0,0081
NEOSSOLOS LITÓLICOS	0,035
CAMBISSOLOS HÁPLICOS	0,06
LATOSSOLOS VERMELHO ESCUROS	0,013
LATOSSOLOS VERMELHO AMARELOS	0,02
ARGISSOLOS VERMELHO AMARELOS	0,029

Fonte: Chaves (1994)

#### 4.3. Modelo Digital de Elevação e fator topográfico (LS)

Para a obtenção do fator topográfico foram realizados os seguintes procedimentos:

- aquisição do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução 1 arco-segundo (~30m);
- correção de falsas depressões;
- geração da área de contribuição e do fator topográfico utilizando-se o *software* USLE-2D.

O Modelo Digital de Elevação (MDE)<sup>11</sup> utilizado é produto do sensor interferométrico *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), da NASA, que possui resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m). Os arquivos foram adquiridos no site do projeto TOPODATA, do INPE, já reamostrados para 1 arco-segundo (~30m). Segundo Valeriano e Rosseti (2008), os dados foram interpolados por meio de *krigagem* após a seleção de

---

<sup>11</sup> Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação da superfície física terrestre em grades retangulares matriciais, em que cada pixel tem um valor numérico da elevação correspondente (WOLF e DEWITT, 2000).

coeficientes geoestatísticos obtidos para diferentes ambientes topográficos do território nacional.

Antes de utilizar o MDE para a geração do fator topográfico, ainda foram preenchidas as falsas depressões. Segundo Tarboton (1991), as falsas depressões ocorrem devido à baixa resolução do arquivo ou erros do imageamento. A correção dessas falhas é realizada para dar consistência e continuidade à rede de drenagem.

Para geração do fator LS foi utilizado o *software* USLE-2D, desenvolvido por Desmet e Goovers (1996). No programa, o cálculo do comprimento de rampa (L) é realizado por uma formulação desenvolvida a partir do método proposto por Foster e Wischmeier (1974) e é representada através da Equação 5 (DESMET e GOVERS, 1996):

$$L_{ij} = \frac{[(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - (A_{ij-in})^{m+1}]}{[D^{m+2} \cdot x_{ij}^m (22,13)^m]} \quad (5)$$

Onde:

**L<sub>ij</sub>** é o fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i,j);

**A<sub>i,j-in</sub>** é a área de contribuição da célula em coordenadas (i,j) (m<sup>2</sup>);

**D** é o tamanho da célula (m);

**x** é o coeficiente função do aspecto para grade de célula em coordenadas (i,j)

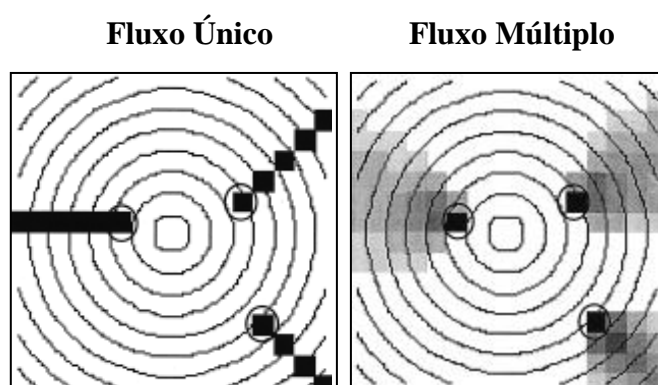
**m** é o coeficiente função da declividade para grade de célula com coordenada (i,j).

O coeficiente “m” é obtido a partir de determinadas classes de declividade: (a) **m** = 0,5 se declividade for > 5%; (b) **m** = 0,4 para intervalo de 3 a 5%; (c) **m** = 0,3 para intervalo de 1 a 3 % e (d) **m** = 0,2 para declividade < 1%.

A área de contribuição é calculada automaticamente, pelo algoritmo desenvolvido por Quinn *et al.* (1991). Esse algoritmo considera o “fluxo múltiplo” (*multiple flow*) e representa uma vantagem em relação ao “fluxo único” (*single flow*), por levar em conta a convergência e divergência do escoamento e não somente um único plano (Figura 21). O



resultado é uma representação mais apropriada da propagação da água em superfícies topograficamente complexas (DESMET e GOVERS, 1996).



**Figura 21:** Representação do comportamento dos algoritmos do fluxo único (*single flow*) e do fluxo múltiplo (*multiple flow*).

Fonte: Tarboton (1997)

No USLE-2D existem quatro opções metodológicas para o cálculo do fator de declividade (S). Neste estudo foi utilizada a relação desenvolvida por McCool *et al.* (1987), que é atualmente adotada como parte da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) e foi utilizada em estudos como os de Beskow *et al.* (2009) e Winchel *et al.* (2008). As equações são escritas da seguinte forma (Equações 6 e 7):

$$S = 10,8 \times \sin \theta + 0,03, \text{ quando declividade} < 9\% \quad (6)$$

$$S = 16,8 \times \sin \theta - 0,5, \text{ quando declividade} \geq 9\% \quad (7)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de declividade.

O programa USLE-2D requer, como dado de entrada, somente o MDE. Foi necessária a conversão dos arquivos para o formato IDRISI do tipo *real (float)*. A área de contribuição e o fator topográfico (LS) são calculados automaticamente pelo software.

#### 4.4. Classificação de Uso e Cobertura do Solo e fator uso e manejo (CP)

Para a classificação do UCS e obtenção do fator CP foram realizadas as seguintes etapas:

- aquisição das imagens do sensor ASTER;
- pré-processamento;
- trabalho de campo;
- classificação do uso e cobertura do solo;
- edição do mapeamento através da interpretação visual;
- atribuição dos valores CP para as classes de UCS.

O mapa de Uso e Cobertura do Solo (UCS) foi gerado pela classificação da imagem do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e pela interpretação visual de imagens de alta resolução.

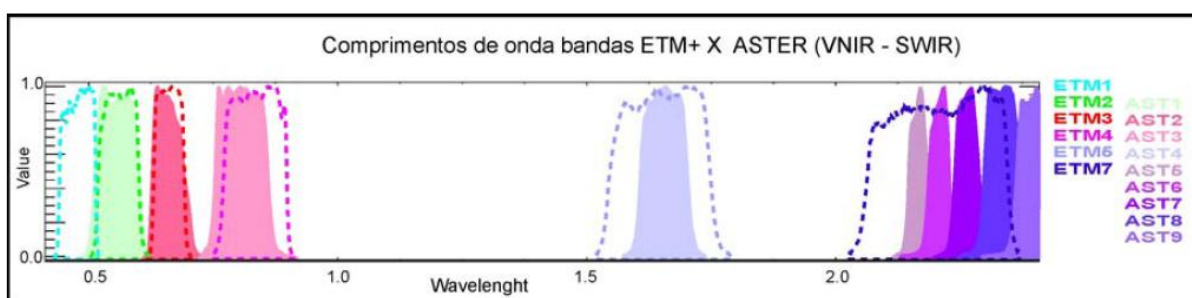
O instrumento ASTER está a bordo do satélite EOS/TERRA, que foi lançado em dezembro de 1999, em um esquema de cooperação entre a NASA e o Ministério de Economia do Japão. O sensor foi projetado para obter informações sobre a temperatura, emissividade, reflectância e elevação da superfície da Terra. Uma cena ASTER recobre uma área de aproximadamente 60x60 km e os dados são adquiridos simultaneamente em três resoluções e 14 bandas, com uma banda adicional imageando para trás, para a criação de estereoscopia (paralaxe).

As especificações da resolução e do comprimento de onda das três bandas do VNIR, utilizadas neste estudo, estão listadas na Tabela 11. Elas são representadas pelos comprimentos de onda do verde (0,52-0,60), do vermelho (0,63-0,69) e do infravermelho próximo (0,76-0,86). É possível observar, na Figura 22, que essas bandas são semelhantes às bandas 2, 3 e 4 do sensor LANDSAT.

**Tabela 11: Comprimento de onda e resolução espacial das bandas do sensor ASTER**

Banda	Rótulo	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução
B1	VNIR_Banda1	0,52 - 0,60	15m
B2	VNIR_Banda2	0,63 - 0,69	15m
B3	VNIR_Banda3N	0,76 - 0,86	15m

Fonte: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>.



**Figura 22:** Comprimento de onda das bandas dos sensores LANDSAT ETM e ASTER.  
Fonte: CPRM (2005).

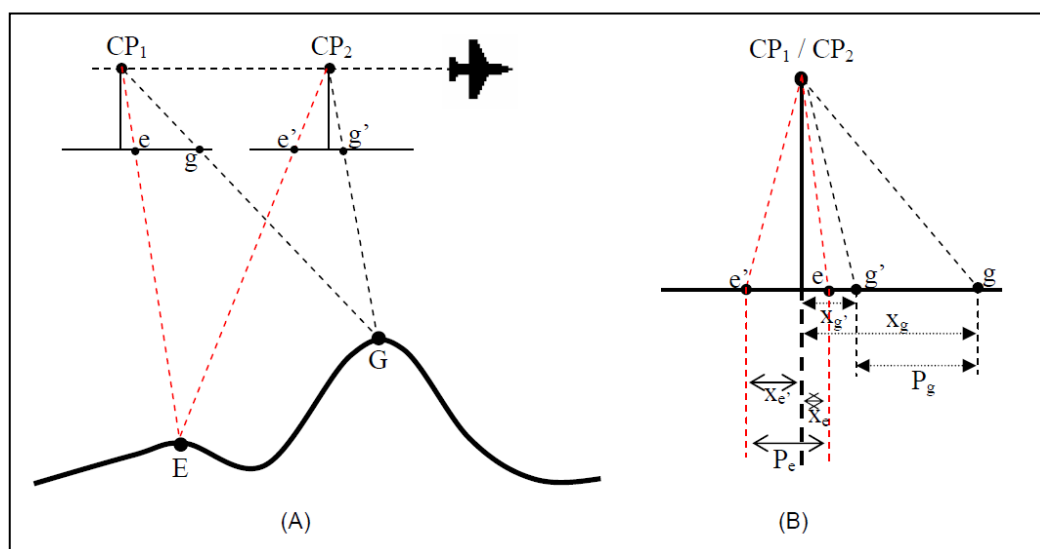
Foram adquiridas 5 cenas com data de imageamento de agosto de 2010 (Tabela 12). Uma correção geométrica foi efetuada para ajustar os *pixels* a um sistema de projeção e coordenadas definidos. O software ENVI<sup>®</sup> possui uma ferramenta específica para o registro das imagens ASTER. A técnica adotada foi a de ortorretificação<sup>12</sup>, sendo que os dados do SRTM foram utilizados para representar a topografia. A verificação do ajuste das imagens foi feito após aquisição de pontos de controle em trabalho de campo. A técnica de ortorretificação apresentou melhor ajuste quando comparada aos métodos planimétricos de correção geométrica. Isso ficou evidente em áreas de maior altitude. O deslocamento das imagens ocorre devido à paralaxe, que é o deslocamento aparente da posição de um objeto causado pela mudança do ponto de observação (WOLF e DEWITT, 2000). A Figura 23 exemplifica esse fenômeno em uma lente de uma câmara aerotransportada, onde os pontos **E** e **G** foram imageados em **e** e **g** na fotografia da esquerda, e **e'** e **g'** na da direita. Pelo ponto **G** ser mais alto e próximo da câmera (Figura 23a), o efeito da paralaxe é maior (Figura 23b). Caso os dois pontos tivessem a mesma altitude, o efeito da paralaxe seria

<sup>12</sup> A ortorretificação é um método de correção geométrica tridimensional (3D) que considera o efeito do terreno no deslocamento da imagem. Para efetuar esta operação no ENVI<sup>®</sup>, são necessários dados sobre o relevo, que neste estudo foram os arquivos do SRTM, e os coeficientes racionais polinomiais (RPC – *Rational Polynomial Coefficients*), que são informações específicas de cada sensor geralmente presentes nos arquivos da imagem (ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, 2009).

idêntico em ambos. Depois de corrigidas geometricamente, foi construído um mosaico das 5 imagens. Nessa etapa, uma normalização radiométrica foi aplicada, para compatibilizar as amplitudes dos níveis de cinza nas três bandas espectrais das imagens.

**Tabela 12: Cenas ASTER utilizadas para a construção do mosaico**

Cena	Data
ASTL1A 1008091314251008120596	09/08/2010
ASTL1A 1008091314331008120597	09/08/2010
ASTL1A 1008091314421008120598	09/08/2010
ASTL1A 1008251314361008280264	25/08/2010
ASTL1A 1008251314451008280265	25/08/2010



**Figura 23:** Esquema do efeito paralaxe em uma lente de uma câmera aerotransportada  
Fonte: Santos (2010)

Outra etapa metodológica no mapeamento do UCS foram os trabalhos de campo, realizados com as seguintes finalidades: (i) coletar pontos utilizando-se o *Global Positioning System* (GPS) para correção geométrica da imagem; (ii) coleta de sítios de amostragem representativos das classes de UCS; (iii) observar e analisar evidências de formas erosivas. Foram realizadas quatro campanhas de campo: (1) março de 2010, (2) setembro de 2010, (3) outubro de 2010 e (4) novembro de 2010.

Os pontos para a correção geométrica foram registrados em locais como cruzamento de estradas, pontes, quinas e em locais passíveis de serem identificados na imagem. Na

seleção dos sítios de amostragem para o mapeamento do UCS houve o registro da maior variabilidade possível entre as classes. Essas foram pré-definidas por construção de uma chave de classificação. Para ambas as finalidades (correção geométrica e classificação de UCS) as amostras foram coletadas em pontos distribuídos uniformemente na área de estudo.

A chave de classificação, representada na Tabela 13, foi construída tendo como referência os trabalhos de Anderson *et al.* (1976), Cowardin *et al.* (1979) e IBGE (2006).

**Tabela 13: Chave de classificação de Uso e Cobertura do Solo**

Nível I	Nível II
1. Áreas Construídas	1.1. Urbana de Alta Densidade
	1.2. Urbana de Média Densidade
	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

A classificação foi realizada utilizando-se o *software* ER Mapper 7.1<sup>®</sup>. O método adotado foi o algoritmo de Máxima Verossimilhança (MAXVER). Primeiramente, foi feita uma tentativa de classificar todas as classes pré-definidas na chave de classificação. Após a realização de testes, optou-se por retirar as seguintes classes da etapa de treinamento: área urbana, industrial, mineração e cultura permanente. A exclusão dessas classes melhorou o desempenho do classificador.

A validação foi feita usando-se o cálculo da estatística de Kappa, que avalia a precisão total da classificação (FITZGERALD e LEEDS, 1994). A principal diferença entre esse

método e o sucesso total é que o fator sorte é eliminado. O Kappa (K) é calculado pela Equação 8, onde  $r$  é o número de linhas da matriz de confusão;  $x_{ii}$  é o número de observações na linha  $i$  e na coluna  $i$  (na diagonal);  $x_{i+}$  é o total de observações na linha  $i$ ;  $x_{+i}$  é o total de observações na coluna  $i$ ;  $N$  é o número total de observações incluídas na matriz.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (8)$$

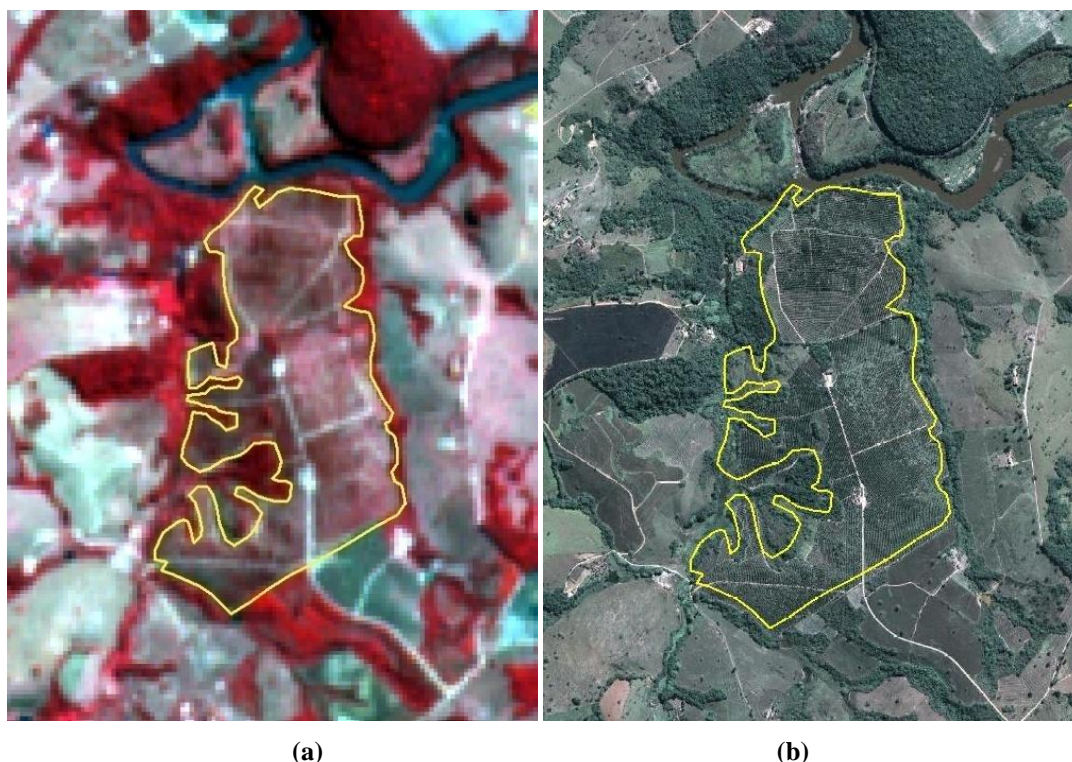
A matriz de confusão é uma tabela que apresenta os erros de classificação entre as classes. É comumente feita através da comparação entre dois mapas temáticos, sendo o mapa de referência (*ground truth*) e a imagem classificada. Para a geração da matriz de confusão e da estatística Kappa, foi utilizado o programa *confusionmatrix* (© Philippe Maillard 2011), escrito na linguagem MATLAB®.

A identificação dos padrões de UCS que correspondem às classes retiradas da classificação supervisionada foi por interpretação visual. Além disso, foram editadas algumas áreas mal classificadas pós-classificação. Para isso, foram utilizadas como apoio, imagens de alta resolução<sup>13</sup> disponíveis no Google Earth®. As imagens ASTER e de alta resolução foram interpretadas lado a lado em duas telas, conforme exemplificado na Figura 24. Outros mapeamentos também auxiliaram na identificação de padrões de UCS (CETEC, 1983; IGA e CETEC, 1996; CIBAPAR, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2005).

Por fim, foram atribuídos os valores de CP para cada classe de UCS conforme os valores estimados por Stein *et al.* (1987).

---

<sup>13</sup> A última geração de imagens de alta resolução tem uma resolução espacial média aproximada de 0,6 metros na banda pancromática e 2-4 metros nas bandas multispectrais (GILLIESON, LAWSON e SEARLE, 2006).



**Figura 24:** Exemplo da classe cultura permanente interpretada visualmente em (a) imagens ASTER e com o apoio de (b) imagens de alta resolução.

Fonte: Adquirido e modificado de ASTER e Google (2010).

#### 4.5. Modelagem do potencial à erosão através da EUPS e de um SIG

Todos os arquivos georreferenciados foram adequados ao sistema de coordenadas e *datum* do projeto (Universal Transversa de Mercator–UTM/ *datum* SAD69). Em seguida foi feito o recorte para a área de estudo e foram criadas as matrizes (*raster*) com resolução espacial de 30 metros. A camada que comandou a definição da resolução foi o MDE, porque reamostragem da topografia em resolução mais baixa (<30m) pode prejudicar a representação da morfologia do terreno e a estimativa do fator topográfico. O mapa de UCS elaborado com resolução de 15m, reamostrado para 30m, também perderia a qualidade em uma resolução mais baixa. Apesar da resolução de análise ser de 30m, a escala de interpretação do mapeamento final é de 1:250.000. Isso porque essa é a escala da camada mais grosseira (erodibilidade). Foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* do *software* ArcGIS 9.3.<sup>®</sup> para a multiplicação dos fatores da EUPS. O Potencial Natural à Erosão foi calculado utilizando-se a Equação 9 e o Potencial Atual à Erosão da Equação

10, 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 conservacionistas.

$$PNE = R \times K \times LS \quad (9)$$

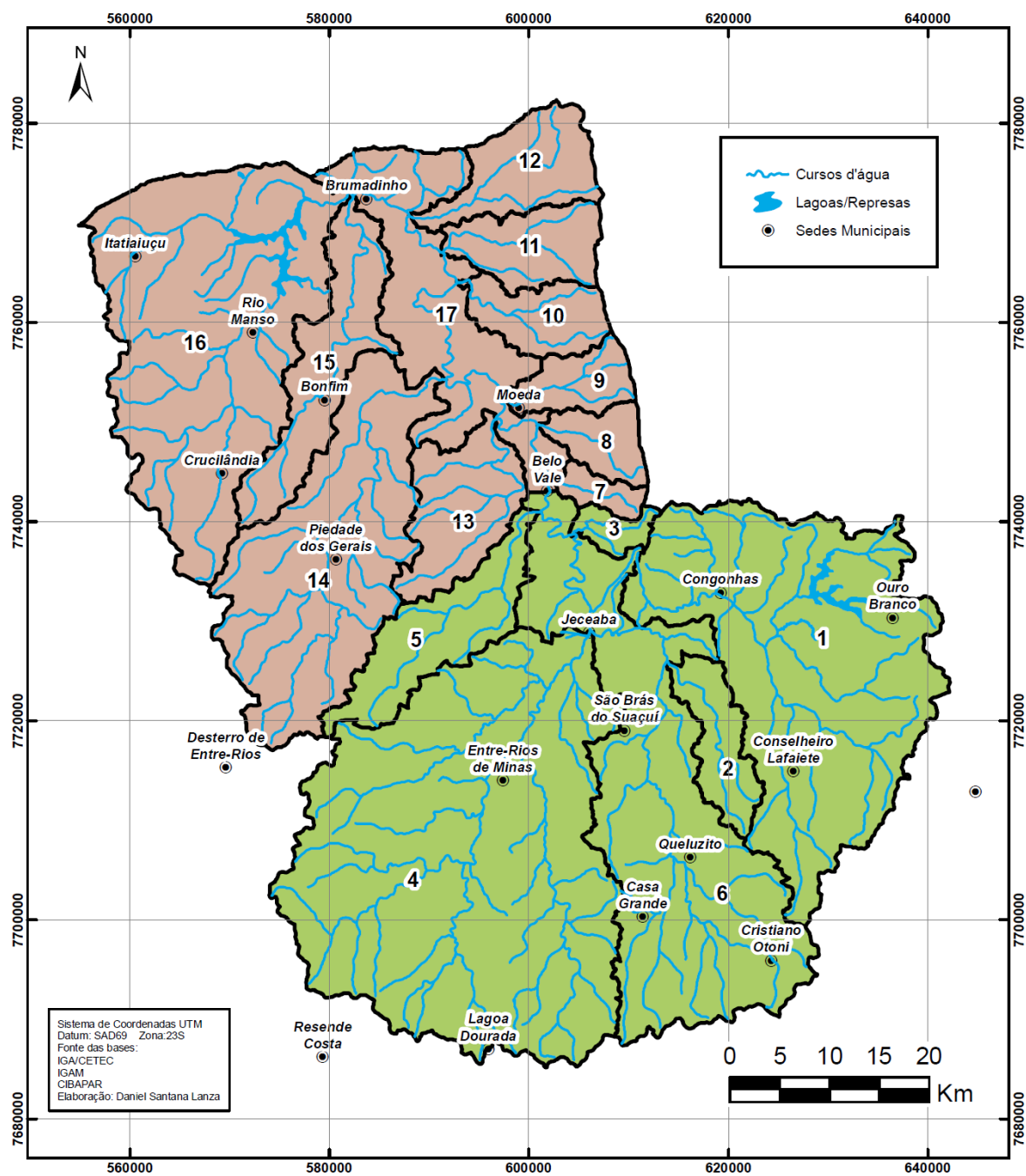
$$Ea = R \times K \times LS \times CP \quad (10)$$


















#### 4.6. Discretização em sub-bacias

A análise ambiental em escala de bacia hidrográfica é amplamente utilizada porque possibilita uma análise sistêmica da superfície terrestre. Botelho (2009) comenta que a utilização da bacia hidrográfica como unidade de análise permite estudar as várias inter-relações entre os diversos elementos e os processos atuantes. Esse atributo de integração qualifica a bacia como unidade ideal para a análise ambiental e o planejamento de uso das terras.

A área de estudo foi discretizada em 17 sub-bacias para fins de análise e comparação (Figura 25). Essas unidades de análise estão divididas em duas grandes regiões (Alto Paraopeba e Médio Paraopeba). Essa duas regiões se diferenciam em alguns aspectos físicos e de ocupação, e se configuram como compartimentos geoambientais distintos (ALMEIDA, 1999; CIBAPAR, 2010). Apesar de terem semelhanças geológicas, o Alto Paraopeba apresenta um maior grau de dissecação e declividades médias mais altas. É também mais industrializado e urbanizado do que o Médio Paraopeba até o Fecho do Funil, localidade que delimita a área de estudo. Além das sub-bacias, os municípios, serras e represas também são referências na localização e na identificação dos padrões de UCS e do potencial de ocorrência de erosão. É recomendada a utilização do mapa no ANEXO I, para a identificação das localidades e das principais referências da área de estudo.



**ALTO****MÉDIO**

 1- Rio Maranhão	 7- Barra da Boa Esperança	 13- Rib. dos Cordeiros
 2- Rio Pequeri	 8- Rib. da Barra	 14- Rio Macaúbas
 3- Cór. dos Moreiras	 9- Ribeirão Contendas	 15- Rib. Aguas Claras
 4- Rio Camapua	 10- Rib. dos Marinhos	 16- Rio Manso
 5- Rib. dos Paivas	 11- Ribeirão Piedade	 17- Vale Médio
 6- Vale Alto	 12- Rib. Casa Branca	

**Figura 25:** Discretização das unidades de análise por sub-bacias

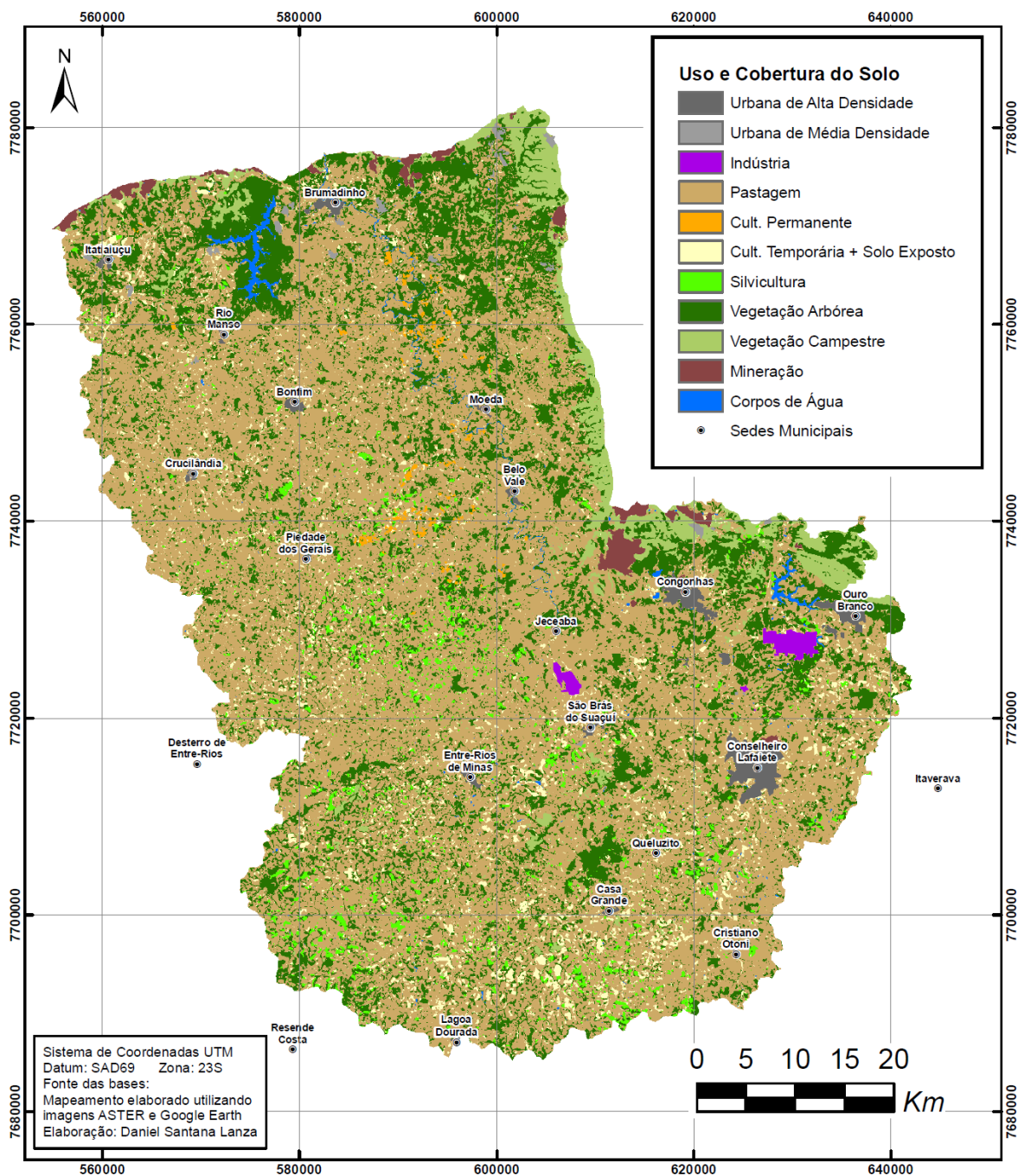
**Tabela 14: Discretização das unidades de análise por região da bacia, margem do rio, sub-bacias e municípios**

		<b>Sub-Bacias</b>	<b>Municípios</b>
<b>ALTO PARAÓPEBA</b>	Margem Direita	<b>1-Maranhão</b>	Ouro Branco, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Itaverava, Ouro Preto
		<b>2-Pequeri</b>	Congonhas e Conselheiro Lafaiete
		<b>3-Rib. dos Moreiras</b>	Belo Vale
	Margem Esquerda	<b>4-Brumado/Camapuã</b>	Lagoa Dourada, Resende Costa, Entre-Rios de Minas e Jeceaba
		<b>5-Rib. Dos Paivas</b>	Desterro de Entre-Rios, Jeceaba e Belo Vale
	Vale	<b>6-Rio Paraopeba até Belo Vale</b>	Cristiano Ottoni, Casa Grande, Queluzito, São Brás do Suaçuí, Jeceaba e Belo Vale
<b>MÉDIO PARAÓPEBA</b>	Margem Direita	<b>7-Rib. Barra da Boa Esperança</b>	Belo Vale
		<b>8-Rib. Da Barra</b>	Moeda
		<b>9-Rib. Contendas</b>	Moeda
		<b>10-Rib. Marinhos</b>	Brumadinho e Moeda
		<b>11-Rib. Piedade</b>	Brumadinho
		<b>12-Rib. Casa Branca</b>	Brumadinho
	Margem Esquerda	<b>13-Rib. Dos Cordeiros</b>	Belo Vale
		<b>14-Rio Macaúbas</b>	Desterro de Entre-Rios, Piedade dos Gerais e Bonfim
		<b>15-Rib. Águas Claras</b>	Crucilândia, Bonfim e Brumadinho
		<b>16-Rio Manso</b>	Crucilândia, Rio Manso, Itatiaiuçu, Bonfim e Brumadinho
	Vale	<b>17-Rio Paraopeba até o Fecho do Funil</b>	Belo Vale, Moeda, Bonfim e Brumadinho

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Uso e Cobertura do Solo

Foram mapeadas 11 classes de Uso e Cobertura do Solo (UCS): urbana de alta densidade, urbana de média densidade, industrial, pastagem, cultura permanente, cultura temporária, silvicultura, vegetação arbórea, vegetação campestre, mineração e corpos de água (Figura 26 e ANEXO II). O mapeamento foi elaborado utilizando os métodos conjugados de classificação supervisionada e interpretação visual. Para isso, imagens de média resolução (ASTER) e alta resolução (Google Earth<sup>®</sup>) foram processadas e interpretadas. Utilizando-se esta abordagem metodológica, foi possível identificar e editar algumas áreas que não foram bem rotuladas através da classificação supervisionada. Algumas áreas (*pixels*) de classes incluídas na classificação como, por exemplo, a cultura temporária e vegetação campestre, foram editadas pós-classificação. As classes cultura permanente, urbana, industrial, e mineração não foram incluídas na etapa de classificação e foram identificadas e vetorizadas por interpretação visual.



**Figura 26:** Mapa de Uso e Cobertura do Solo

É possível observar na Tabela 15 que as classes corpos de água, vegetação arbórea e eucalipto tiveram um bom desempenho na classificação. Houve confusão principalmente entre a vegetação campestre, agricultura temporária e pastagem. Contudo, os erros de classificação não comprometeram significativamente o desempenho total da classificação. O índice Kappa foi de 97%, o que representa um desempenho excelente.

**Tabela 15: Matriz de confusão da classificação supervisionada**

<b>Dados Classificados</b>	<b>Dados de Referência</b>						<b>Total</b>
	Corpos de Água	Vegetação Campestre	Agricultura Temporária	Pastagem	Vegetação Arbórea	Eucalipto	
Corpos de Água	3071	0	0	3	0	0	<b>3074</b>
Vegetação Campestre	0	672	0	254	0	0	<b>926</b>
Cultura Temporária	0	52	2229	31	0	0	<b>2312</b>
Pastagem	0	172	94	19805	0	0	<b>20071</b>
Vegetação Arbórea	0	0	0	6	9337	8	<b>9351</b>
Eucalipto	0	0	0	0	0	2341	<b>2341</b>
<b>Total</b>	<b>3071</b>	<b>896</b>	<b>2323</b>	<b>20099</b>	<b>9337</b>	<b>2349</b>	<b>38075</b>

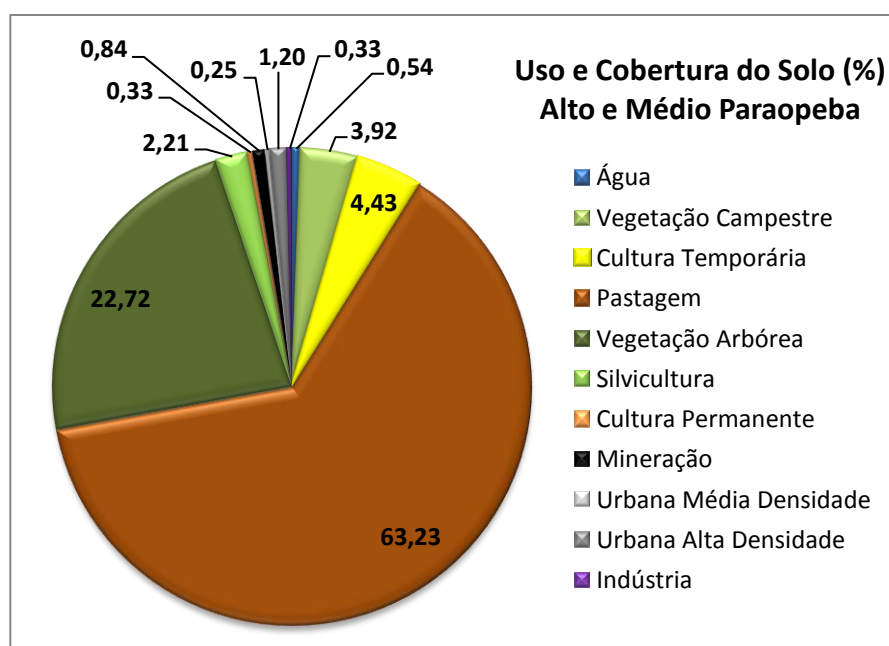
**Sucesso Total: 0,9837**

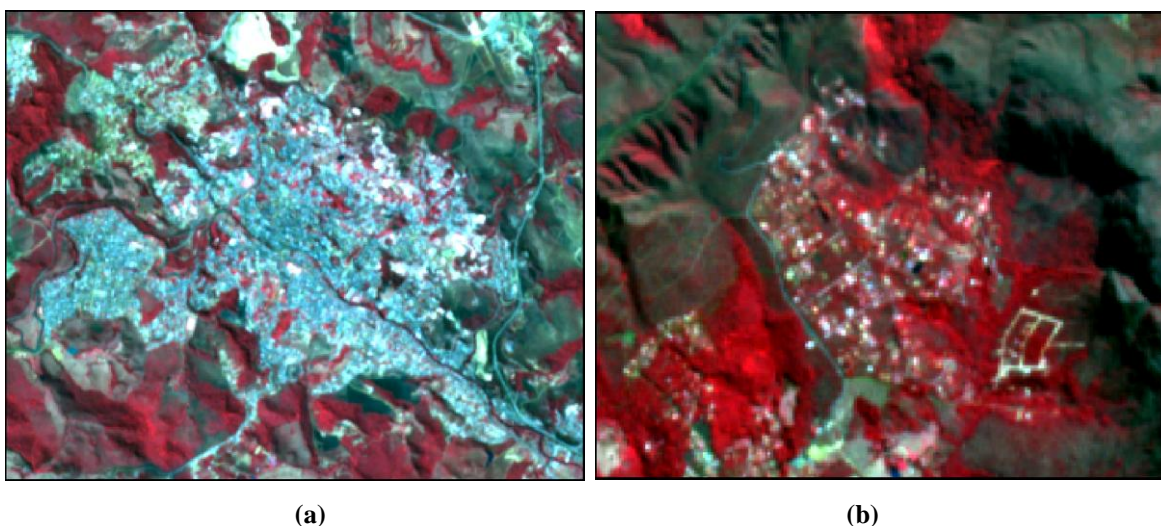
**Estatística Kappa: 0,9748**

As áreas urbanas representam o total de 1,45% da cobertura do solo (Tabela 16 e Figura 27). As classes foram divididas entre alta e média densidade de ocupação. Uma grande quantidade de condomínios e localidades rurais (média densidade) ocorre na área de estudo, diferenciando-se das sedes municipais e centros urbanos (alta densidade) (Figura 28).

**Tabela 16: Distribuição das classes de UCS**

Nível I	Nível II	ÁREA (km <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
1. Áreas Construídas	1.1. Urbana de Alta Densidade	60,3	1,20
	1.2. Urbana de Média Densidade	12,6	0,25
	1.3. Industrial	16,5	0,33
2. Áreas Agrícolas	2.1. Pastagem	3.173,0	63,23
	2.2. Cultura Permanente	16,5	0,33
	2.3. Cultura Temporária	222,2	4,43
	2.4. Silvicultura	110,8	2,21
3. Vegetação Natural	3.1. Vegetação Arbórea	1.140,3	22,72
	3.4. Vegetação Campestre	196,8	3,92
4. Desnudo	4.1. Mineração	42,1	0,84
5. Água	5.1. Corpos de Água	27,1	0,54
<b>TOTAL</b>		<b>5.018,3</b>	<b>100,0</b>

**Figura 27:** Gráfico de distribuição das classes de UCS



**Figura 28:** Imagens ASTER de Áreas urbanas de (a) alta densidade na sub-bacia Maranhão (Congonhas) e (b) média densidade na sub-bacia Casa Branca  
 Fonte: Adquirido e modificado de ASTER (2010)

As indústrias representam 0,33% da área total e estão localizadas no Alto Paraopeba, destacando-se a AÇOMINAS, na sub-bacia do rio Maranhão (Figura 29), e a VSB, entre a sub-bacia do rio Camapuã e o vale do Alto Paraopeba.



**Figura 29:** Foto de área industrial na (a) sub-bacia Maranhão e (b) representação da mesma indústria na cena ASTER

Nas áreas rurais é muito comum haver lavoura, pastagem e eucalipto em pequenas e médias propriedades. Por ocorrerem lado a lado, há confusão na classificação de imagens de média resolução, em função do problema dos *pixels* misturados.

A pastagem é a classe mais representativa, cobrindo 63,23% da área total. As várias espécies de capim (braquiária, meloso, jaraguá) e formas de ocupação e utilização caracterizam os diversificados tipos e condições da pastagem (Figura 30a). Ocorrem pastos ralos e sujos (Figura 30b). Por isso, optou-se por selecionar as áreas de treinamento de

acordo com a resposta espectral da pastagem. Foram identificados quatro tipos diferentes. O método de seleção das amostras foi apoiado na análise estatística, em cada banda espectral, por meio da interpretação de histogramas e scattergramas.



**Figura 30:** (a) Três condições de pastagem distintas na sub-bacia Manso e (b) pastos ralos e sujos na sub-bacia Barra

A classe cultura permanente é representada principalmente pelos pomares de citros (mexerica pokan, laranja, limão) (Figura 31). Essa classe não foi incluída na classificação supervisionada e foi mapeada por interpretação visual. Ocorrem, predominantemente, na sub-bacia do ribeirão Cordeiros e no vale do Médio Paraopeba, e cobrem 0,33% da área de estudo. A presença de Latossolos, que são profundos e bem drenados, favorece a implantação deste tipo de cultura agrícola na região.



**Figura 31:** Pomar de citros (laranja) na (a) sub-bacia Cordeiros e (b) no vale do Médio Paraopeba



As culturas temporárias ou anuais, que cobrem 4,43% da área, possuem um comportamento bastante dinâmico, já que são condicionadas pela temporalidade. As lavouras são representadas principalmente por cultivos de hortaliças (Figura 32), milho, cana e mandioca. Nas áreas irrigadas, o plantio e a colheita são realizados durante todo o ano. Em outras áreas, em que não há irrigação, a aração do solo e o plantio são realizados principalmente no final do período seco. As imagens classificadas são do mês de agosto. Por isso, várias áreas de agricultura temporária apresentam solo exposto. Devido à dificuldade em separar as glebas de preparo de plantio sem cobertura de outras áreas degradadas não agrícolas, as áreas de solo exposto estão representadas na classe cultura temporária.



**Figura 32:** Lavoura irrigada de hortaliças nas sub-bacias (a) Manso e (b) Marinhos

A silvicultura é caracterizada principalmente pelo cultivo de eucalipto (Figura 33), e representa 2,21% da cobertura do solo. Essa classe teve um bom desempenho na classificação supervisionada. Um dos motivos é que apresenta uma resposta espectral característica, devido à alta reflectância na banda do infravermelho. Os indivíduos possuem a mesma altura e são igualmente espaçados entre si. Isso faz com que haja pouca sombra e, conseqüentemente, uma resposta espectral homogênea da superfície das folhas. A silvicultura ocorre em grande parte da área de estudo, destacando-se as sub-bacias Camapuã, Cordeiros, Paivas, Maranhão, Macaúbas e o vale do Alto Paraopeba.



(a)

(b)

**Figura 33:** Cultivo de eucalipto nas sub-bacias (a) Cordeiros e (b) Paivas

A vegetação arbórea, por sua vez, é floristicamente heterogênea e os indivíduos possuem alturas variadas, o que provoca sombreamento na copa dos indivíduos mais baixos. Devido aos vários estágios de sucessão em que se encontram as áreas de vegetação, foram criadas mais de uma categoria na etapa de treinamento. Após a classificação, elas foram unidas para a criação da classe vegetação arbórea, que representa 22,72% da cobertura do solo e ocorre principalmente em fragmentos de mata e nas margens dos corpos de água (Figura 34).



(a)

(b)

**Figura 34:** Vegetação arbórea em (a) Capão de Mata próximo as nascentes no vale do Alto Paraopeba e (b) ao fundo na Serra do Camapuã

A vegetação campestre ocorre nos complexos serranos do Quadrilátero Ferrífero (Figura 35) e também na região do Campo das Vertentes, no Alto Paraopeba. É representada por 3,92% da cobertura total. Na classificação, houve confusão entre essa classe com a

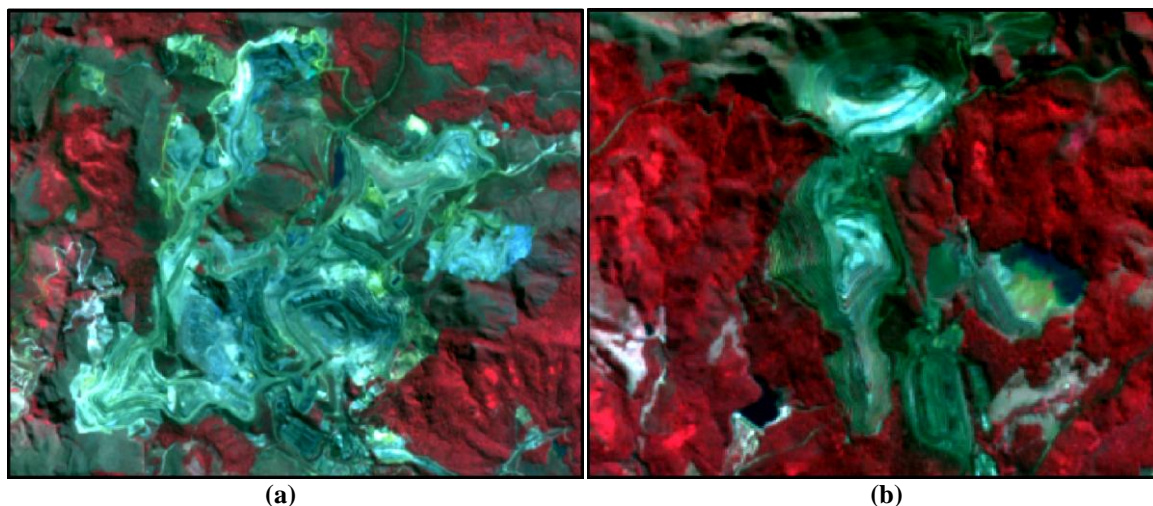
pastagem, principalmente em áreas de litologia composta por xistos, filitos e quartzitos. Sobre os itabiritos, houve menor confusão, provavelmente em função da presença típica de concreções ferruginosas.

No Campo das Vertentes, na sub-bacia do rio Camapuã e no leito do Alto Paraopeba, essa categoria de vegetação se encontra bastante degradada. As gramíneas naturais competem com as pastagens plantadas e as áreas de cobertura das espécies nativas são pequenas. Isso também dificulta o mapeamento automático dessa classe, devido à confusão com a pastagem. Por isso, foi necessária a edição manual do mapeamento em algumas áreas com ocorrência de vegetação campestre.



**Figura 35:** Vegetação Campestre sobre a (a) Serra de Ouro Branco e (b) Serra da Moeda

As áreas de mineração ocupam 0,84% da cobertura total. Destacam-se a extração dos minérios de ferro e manganês no Quadrilátero Ferrífero. Essa classe, assim como as áreas urbanas e industriais, é facilmente identificável nas imagens ASTER e foi interpretada visualmente (Figura 36).



**Figura 36:** Imagens ASTER de áreas de mineração nas sub-bacias (a) Maranhão e (b) Casa Branca  
 Fonte: Adquirido e modificado de ASTER (2010)

Por fim, a classe corpos de água representa todos os corpos de água superficiais, incluindo os cursos de água (Figura 37), represas (Figura 38), lagos e açudes. A água dos rios apresenta turbidez mais elevada do que das represas. Por isso, as áreas de treinamento foram selecionadas em duas categorias distintas. Essa classe teve um bom desempenho na classificação.



**Figura 37:** Rio Paraopeba (a) próximo ao Fecho do Funil e (b) em Jeceaba na confluência com o rio Camapuã



**Figura 38:** Represa Soledade (a) vista da Serra de Ouro Branco e (b) representada na imagem ASTER  
 Fonte: (b) Adquirido e modificado de ASTER (2010)

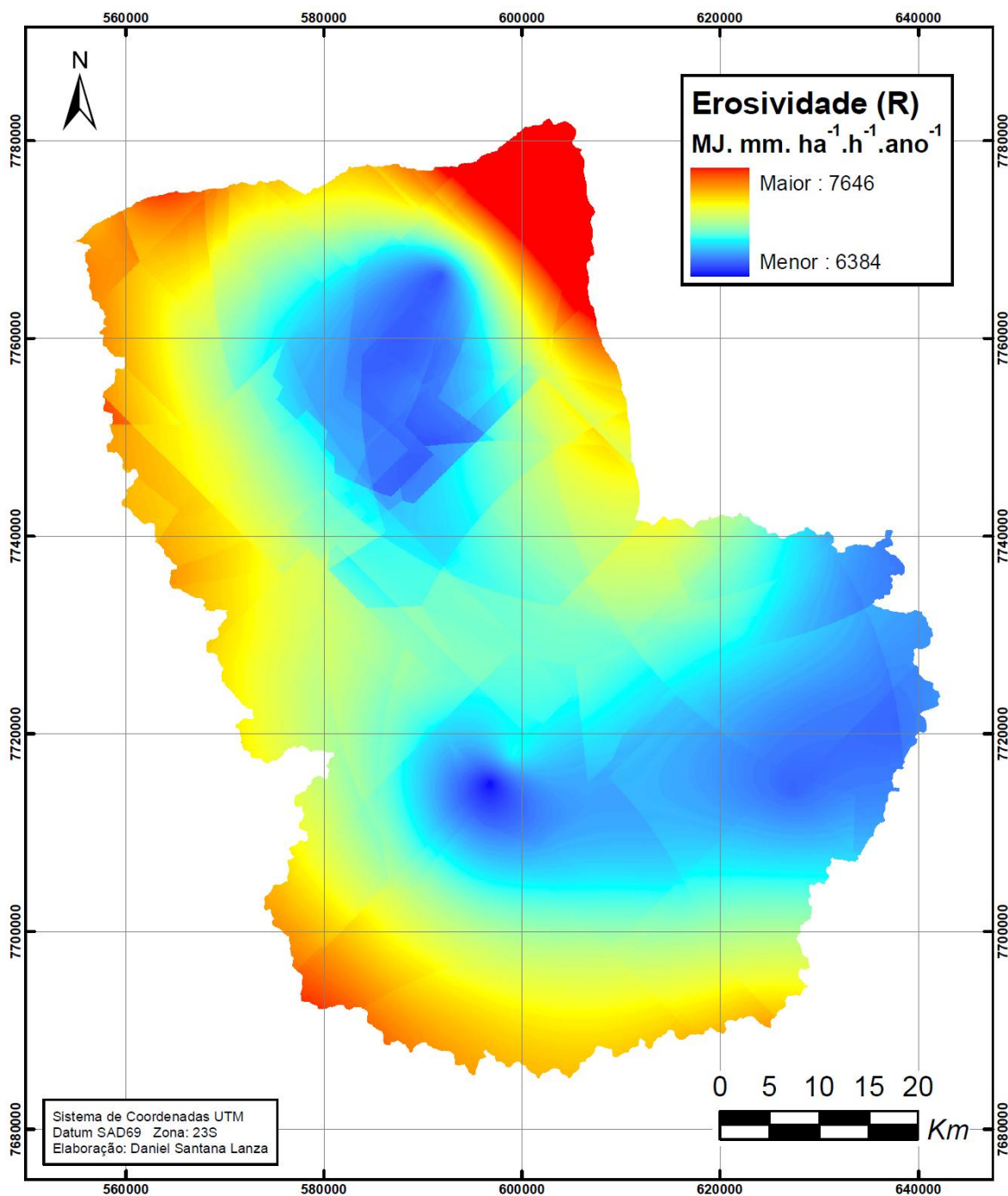
## 5.2. Potencial natural à erosão (PNE)

A **erosividade (R)** anual na bacia de estudo varia entre 6.384 a 7.646 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 39). É considerada de média-forte a forte, tendo como referência a chave de interpretação proposta por Carvalho (1994) e Silva (2004a) (Tabela 17). Os resultados obtidos estão próximos aos obtidos por Silva (2004a) e Mello *et al.* (2007), que calcularam e mapearam a erosividade em escala nacional e estadual.

**Tabela 17: Classes de Interpretação de erosividade da chuva**

MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	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 (2004a)



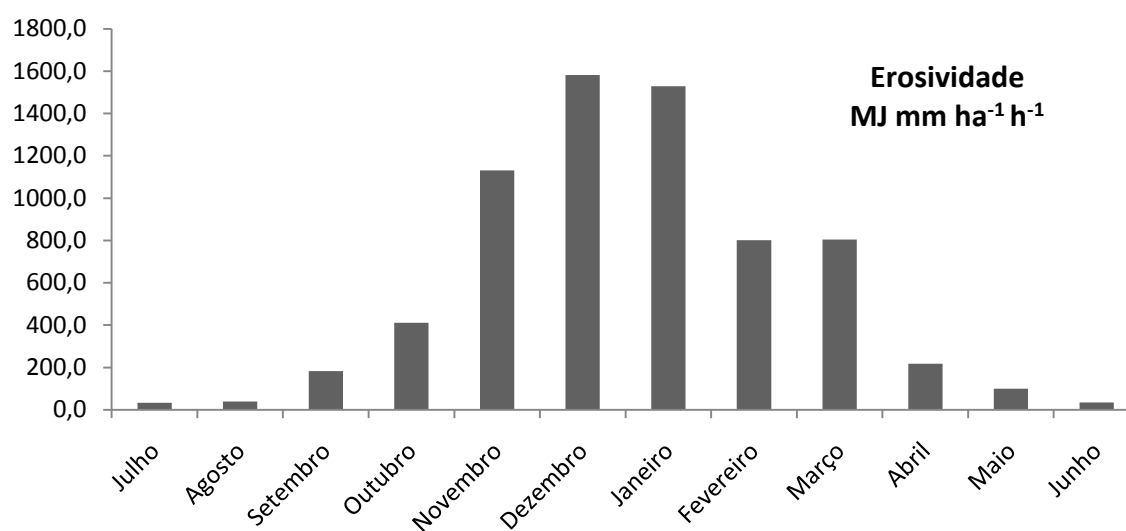
**Figura 39:** Mapa da erosividade

A distribuição média mensal da erosividade nas 34 localidades (estações pluviométricas) analisadas revela que os valores maiores estão concentrados nos meses de dezembro e janeiro (Tabela 18 e Figura 40). Um total de 45,3% do potencial da chuva em causar erosão e 41,4% do total precipitado está nesses dois meses. Considerando todo o período úmido, que vai de outubro a março, a erosividade anual é representada por 91%. É nesse período crítico que medidas de prevenção devem ser tomadas. É de fundamental

importância procurar manter o solo coberto, seja por vegetação ou resíduos de lavouras, para, dessa forma, evitar ou amenizar a aceleração de processos erosivos.

**Tabela 18: Valores médios mensais e anual de precipitação e erosividade**

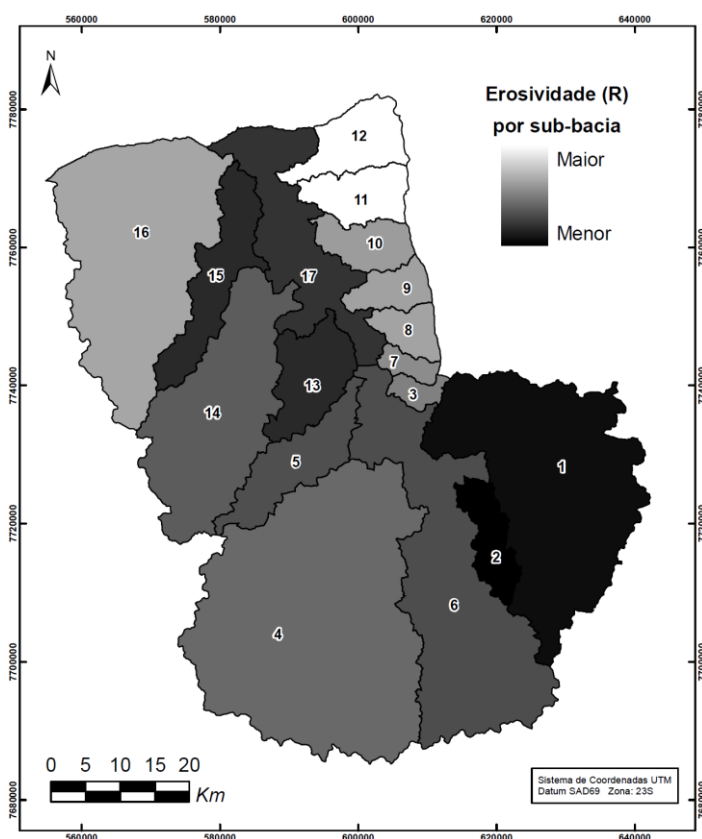
Meses	Precipitação Média Mensal (mm)	Erosividade	
		MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
Julho	14,6	33,5	0,5
Agosto	16,7	38,6	0,6
Setembro	58,3	182,5	2,7
Outubro	104,5	411,6	6,0
Novembro	224,2	1131,6	16,5
Dezembro	313,6	1581,2	23,0
Janeiro	301,0	1529,0	22,3
Fevereiro	170,3	801,1	11,7
Março	170,9	804,8	11,7
Abril	66,4	218,0	3,2
Maio	36,8	98,9	1,4
Junho	15,2	34,8	0,5
<b>TOTAL</b>	<b>1492,6</b>	<b>6865,6</b>	<b>100,0</b>



**Figura 40:** Gráfico da erosividade mensal obtida através do índice de erosividade (EI)

Os locais com os valores mais altos de R correspondem aos mesmos com as maiores médias anuais de precipitação. São as áreas topograficamente mais elevadas, que correspondem às bordas da bacia. Os valores maiores estão localizados nas serras Três Irmãos, Azul, Moeda e das Vertentes. As sub-bacias da margem direita do Médio Paraopeba, com as cabeceiras localizadas na Serra da Moeda, possuem os valores médios mais altos, destacando-se a do ribeirão Casa Branca, com  $7.241,7 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 41 e Tabela 19).

Na região próxima a Entre Rios de Minas e São Brás do Suaçuí, no Alto Paraopeba, ocorre uma área topograficamente rebaixada, que tem médias anuais de precipitação e erosividade relativamente baixas. As sub-bacias do Maranhão ( $6.558,6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e Pequeri ( $6.533,5 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) são as que apresentaram os valores médios mais baixos de R (Figura 41 e Tabela 19).



**Figura 41:** Mapa da erosividade por sub-bacia



**Tabela 19: Erosividade por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de Interpretação (%)					Média de R*
				Baixa	Média	Média- Forte	Forte	Muito Forte	
Casa Branca	Médio	12	125,0	0	0	59,0	41,0	0	<b>7241,7</b>
Piedade	Médio	11	104,4	0	0	99,4	0,6	0	<b>6950,2</b>
Manso	Médio	16	674,3	0	0	100	0	0	<b>6798,5</b>
Barra	Médio	8	57,5	0	0	100	0	0	<b>6794,2</b>
Contendas	Médio	9	65,0	0	0	100	0	0	<b>6787,4</b>
Marinhos	Médio	10	86,8	0	0	100	0	0	<b>6782,4</b>
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	0	0	100	0	0	<b>6756,6</b>
Moreiras	Alto	3	28,9	0	0	100	0	0	<b>6740,0</b>
Camapuã	Alto	4	1106,0	0	0	100	0	0	<b>6699,4</b>
Macaúbas	Médio	14	477,2	0	0	100	0	0	<b>6681,4</b>
Paivas	Alto	5	161,2	0	0	100	0	0	<b>6661,9</b>
Vale Alto	Alto	6	658,2	0	0	100	0	0	<b>6658,5</b>
Vale Médio	Médio	17	304,8	0	0	100	0	0	<b>6618,2</b>
Águas Claras	Médio	15	182,2	0	0	100	0	0	<b>6599,8</b>
Cordeiros	Médio	13	147,8	0	0	100	0	0	<b>6599,6</b>
Maranhão	Alto	1	723,1	0	0	100	0	0	<b>6558,6</b>
Pequeri	Alto	2	86,8	0	0	100	0	0	<b>6533,5</b>

\*MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>

A **erodibilidade (K)** na área de estudo varia entre 0,0105 e 0,05 Mg ha MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Foi feita a ponderação dos valores de K, considerando-se as associações de classes por unidades de mapeamento de solos (Tabela 20 e Figuras 42 e 43). Quando há associação de Cambissolos e Neossolos Litólicos são verificadas as mais altas erodibilidades. A associação de Cambissolos com Latossolos tende a reduzir a estimativa do valor de K para alguns locais com Cambissolos bastante erodíveis como, por exemplo, no Alto Paraopeba. Contudo, a maior parte da bacia é composta por áreas com erodibilidade média ou alta, considerando a chave de interpretação adaptada de Carvalho (1994) (Tabela 21).

**Tabela 20: Erodibilidade das unidades de mapeamento de solos**

<b>Código</b>	<b>Unidades de Mapeamento de Solos</b>	<b>K</b>
RYve	Neossolos Flúvicos	0,03144
RL6	Neossolos Litólicos + Cambissolos Háplicos (70-30%)	0,0425
RL15	Neossolos Litólicos + Cambissolos Háplicos + Afloramento de Rochas (40-30-30%)	0,032
RLd3	Neossolos Litólicos	0,035
AR2	Afloramento de Rochas + Neossolos Litólicos (60-40%)	0,0105
LVd2	Latossolos Vermelhos	0,013
LVd7	Latossolos Vermelhos	0,013
LVd9	Latossolos Vermelhos + Argissolos Vermelho-Amarelos (60-40%)	0,0194
LVd12	Latossolos Vermelhos + Cambissolos Háplicos (70-30%)	0,0271
LVAa8	Latossolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos (60-40%)	0,036
LVAa10	Latossolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos (70-30%)	0,032
LVAAd14	Latossolos Vermelho-Amarelos + Argissolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos (40-30-30%)	0,0347
CXa11	Cambissolos Háplicos + Neossolos Litólicos (60-40%)	0,05
CXa17	Cambissolos Háplicos + Argissolos Vermelho-Amarelos + Latossolos Vermelho-Amarelos (40-30-30%)	0,0387
CXd6	Cambissolos Háplicos + Argissolos Vermelho-Amarelos (60-40%)	0,0476
PVAd4	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,029
PVAd6	Argissolos Vermelho-Amarelos + Latossolos Vermelhos (60-40%)	0,0226
PVAd10	Argissolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos (60-40%)	0,0414
PVAd13	Argissolos Vermelho-Amarelos + Cambissolos Háplicos + Neossolos Litólicos (40-30-30%)	0,0401

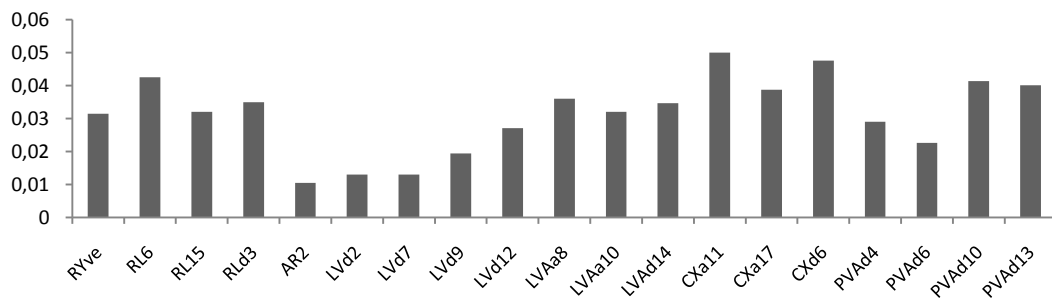


Figura 42: Gráfico da erodibilidade das unidades de mapeamento de solo

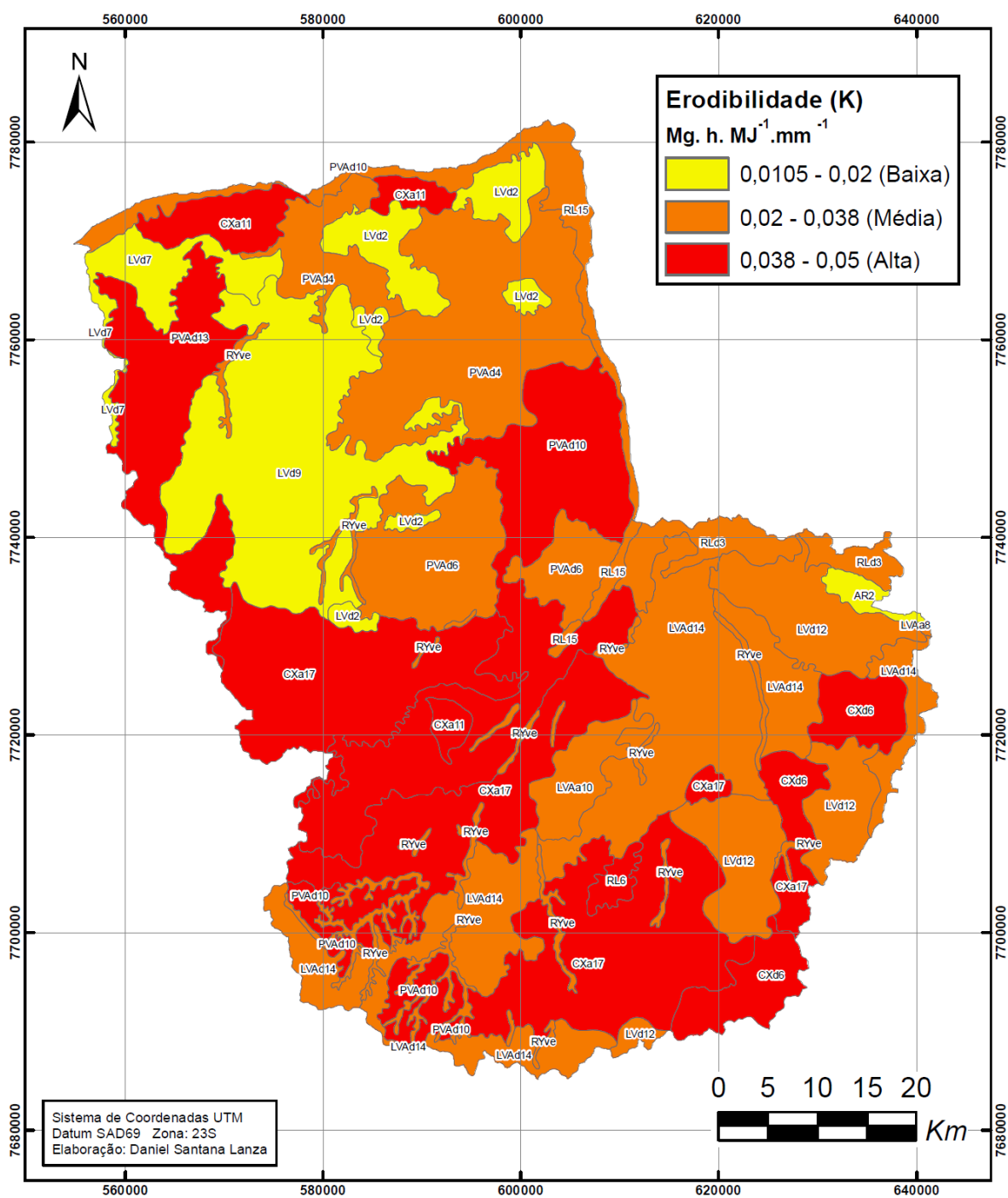


Figura 43: Mapa da erodibilidade dos solos

**Tabela 21: Distribuição da erodibilidade em classes de interpretação**

Intervalos de valores de K	Classes de Interpretação	Área (%)
$K < 0,02$	Erodibilidade Baixa	15,7
$0,02 < K < 0,038$	Erodibilidade Média	43,1
$k > 0,038$	Erodibilidade Alta	41,1

Os Latossolos são os solos mais resistentes da área de estudo. São geralmente bem drenados, profundos e coesos. Possuem alto grau de estabilidade dos agregados, alta porosidade e a permeabilidade é relativamente rápida (CETEC, 1983). Nas unidades de mapeamento, estão associados aos Cambissolos e Argissolos.

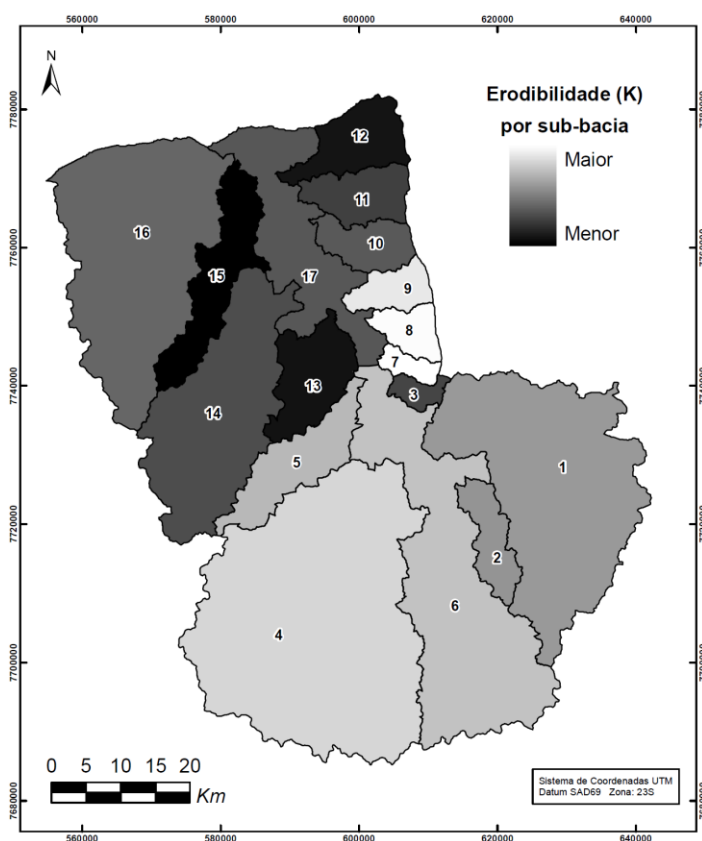
Os Argissolos são caracterizados pela movimentação da argila e formação de horizonte B textural. O acúmulo da argila nesse horizonte provoca o entupimento dos poros, o que dificulta a penetração da água e favorece a erosão. Os Argissolos ocorrem geralmente ao lado dos Latossolos, mas também estão associados aos Cambissolos.

Já os Cambissolos são geralmente rasos, com estrutura em blocos e de baixa permeabilidade. O encrostamento que ocorre na superfície desse tipo solo favorece o deflúvio e a erosão acelerada (SILVA, 2009a). Da área de estudo, são os solos mais suscetíveis à erosão.

Os Neossolos Litólicos estão em áreas com declives muito íngremes, em que a erosão é muito maior do que a pedogênese. Por serem rasos, são bastante frágeis e suscetíveis à erosão devido à saturação rápida de água. Na área de estudo, esses solos se desenvolvem principalmente sobre itabiritos e quartzitos. O material de origem quartzítico favorece a formação de solos de textura arenosa. Por isso, as partículas desagregam com facilidade. Já nos solos formados sobre itabiritos ocorrem concreções ferruginosas, denominadas de cangas, que são bastante resistentes à erosão mecânica. Como não foi possível discernir as características particulares dos Neossolos Litólicos, os valores de K foram superestimados para os solos cobertos por canga. Segundo o IBRAM (2004), apesar de a canga ser um material duro e resistente, a vegetação natural deve ser preservada, pois o material subjacente apresenta fragilidade.

As três sub-bacias com valores médios de erodibilidade mais alto são: Barra, Barra da Boa Esperança e Contendas (Figura 44 e Tabela 22). Nessa área há uma associação de Argissolos com Cambissolos, que determinam os valores altos de K. A sub-bacia do rio Camapuã e o vale do Alto Paraopeba também possuem predominância de solos com alta erodibilidade em função da presença dessa mesma associação. Porém, o valor médio de K é reduzido em função da ocorrência de Latossolos. Nas sub-bacias Casa Branca, Cordeiros e Águas Claras os valores médios de K são os mais baixos de toda a área de estudo, devido à presença predominante de Latossolos.

É necessário salientar que a estimativa do fator K é prejudicada devido à escala de mapeamento de solos (1:250.000). Em um mapa com escala maior seria possível diferenciar as classes de solos com maior detalhamento e, dessa forma, identificar as áreas de erodibilidade com maior precisão espacial.



**Figura 44:** Mapa de erodibilidade por sub-bacia

**Tabela 22: Erodibilidade por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de Interpretação (%)			Média de K*
				Baixa	Média	Alta	
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	0,0	7,2	92,8	<b>0,0405</b>
Barra	Médio	8	57,5	0,0	10,8	89,2	<b>0,0404</b>
Contendas	Médio	9	65	0,0	21,0	79,0	<b>0,0390</b>
Camapuã	Alto	4	1106,0	0,0	35,4	64,6	<b>0,0378</b>
Vale Alto	Alto	6	658,2	0,0	44,3	55,7	<b>0,0365</b>
Paivas	Alto	5	161,2	0,0	21,0	79,0	<b>0,0358</b>
Maranhão	Alto	1	723,1	2,9	78,1	19,0	<b>0,0336</b>
Pequeri	Alto	2	86,8	0,0	86,2	13,8	<b>0,0334</b>
Manso	Médio	16	674,3	42,9	12,2	44,9	<b>0,0301</b>
Marinhos	Médio	10	86,8	2,8	93,2	4,1	<b>0,0292</b>
Vale Médio	Médio	17	304,8	23,5	55,0	21,6	<b>0,0291</b>
Macaúbas	Médio	14	477,2	37,5	23,8	38,7	<b>0,0284</b>
Moreiras	Alto	3	28,9	0,0	90,6	9,4	<b>0,0280</b>
Piedade	Médio	11	104,4	10,5	89,5	0,0	<b>0,0276</b>
Casa Branca	Médio	12	125,0	35,1	64,9	0,0	<b>0,0246</b>
Cordeiros	Médio	13	147,8	12,1	75,3	12,6	<b>0,0245</b>
Águas Claras	Médio	15	182,2	83,5	16,3	0,2	<b>0,0204</b>

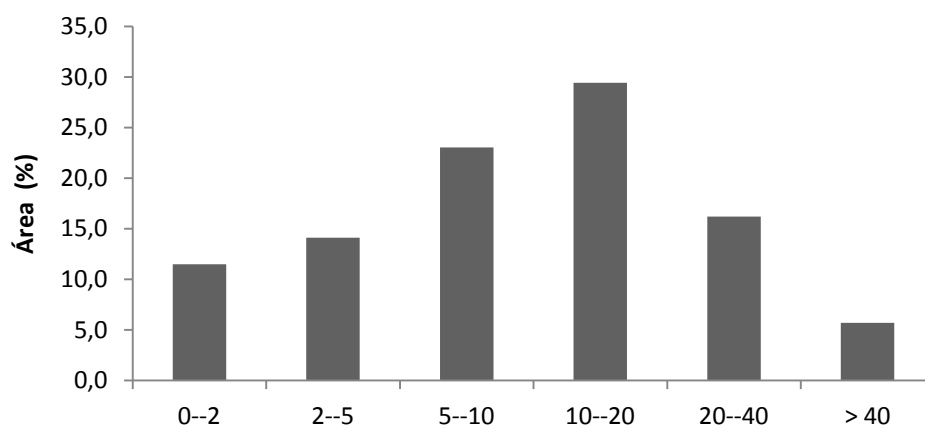
\*Mg. h. MJ<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>

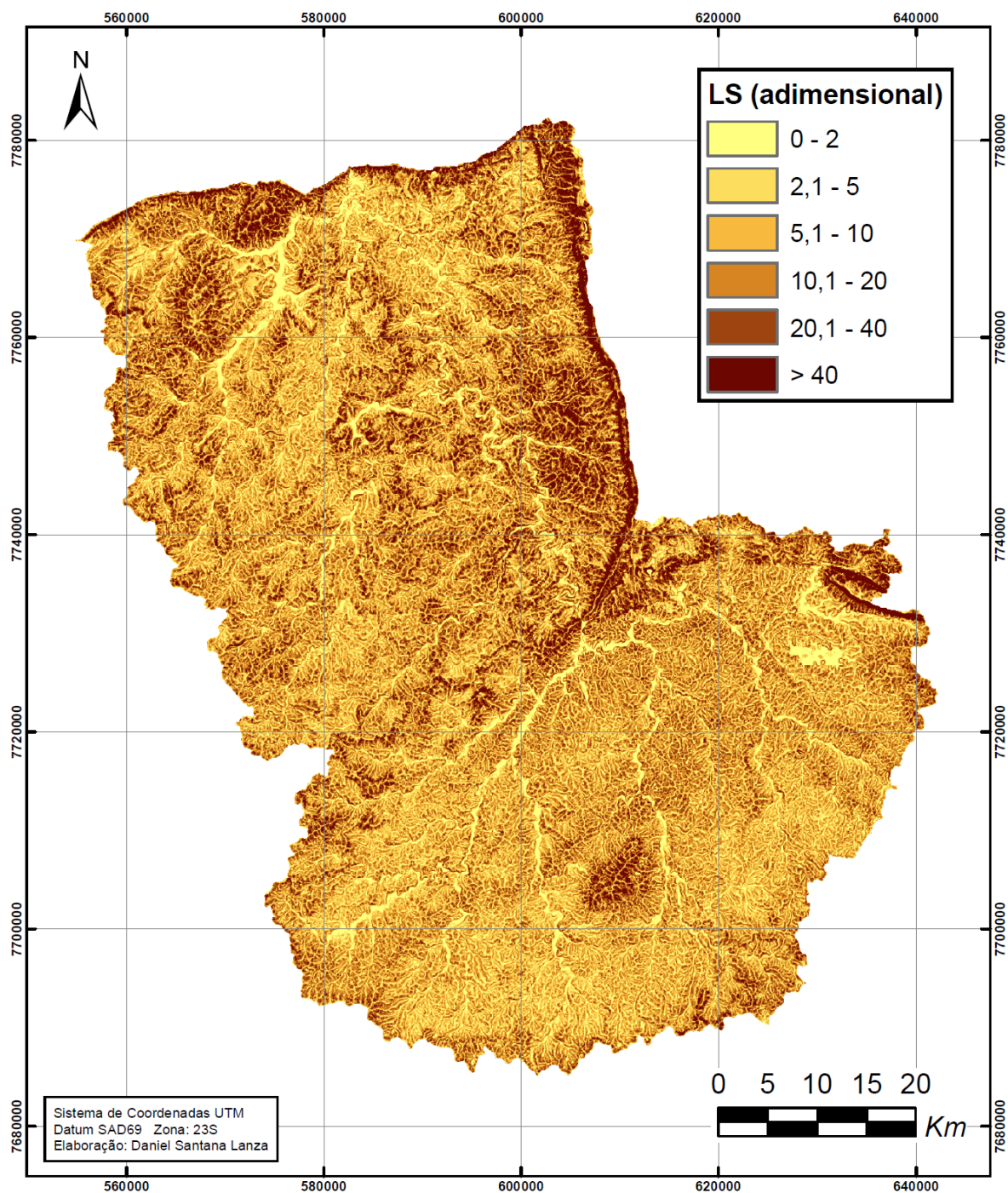
O **fator topográfico (LS)** é adimensional e representa o efeito combinado da declividade e do comprimento de rampa sobre a erosão.

Os resultados revelam que 48,7% dos valores são abaixo de 10 (Tabela 23 e Figura 45). Segundo Costa (2005), os valores de LS acima de 8 são considerados altos. É possível observar, na Figura 46, que os valores mais baixos (entre 0 e 2) estão localizados nas áreas de várzea dos principais rios e ribeirões e nas áreas deprimidas. Os valores mais altos (acima de 40) estão localizados nos complexos serranos.

**Tabela 23: Classes de distribuição do fator topográfico**

Classes LS (adimensional)	%	Freq. acumulada
0—2	11,5	11,5
2—5	14,1	25,6
5—10	23,1	48,7
10—20	29,4	78,1
20—40	16,2	94,3
> 40	5,7	100,0

**Figura 45: Distribuição dos valores do fator topográfico**



**Figura 46:** Mapa do fator topográfico

As serras do Quadrilátero Ferrífero possuem os valores mais expressivos de LS. As sub-bacias da margem direita do Médio Paraopeba, com as cabeceiras localizadas na Serra da Moeda (Figura 47), possuem os valores médios mais elevados, que variam entre 20,4 e 37,1 (Tabela 24 e Figura 48). As amplitudes altimétricas nessas sub-bacias possuem entre 745,2 e 820,2 m, o que significa muita energia do relevo, levando-se em consideração a pequena área dessas unidades de análise.



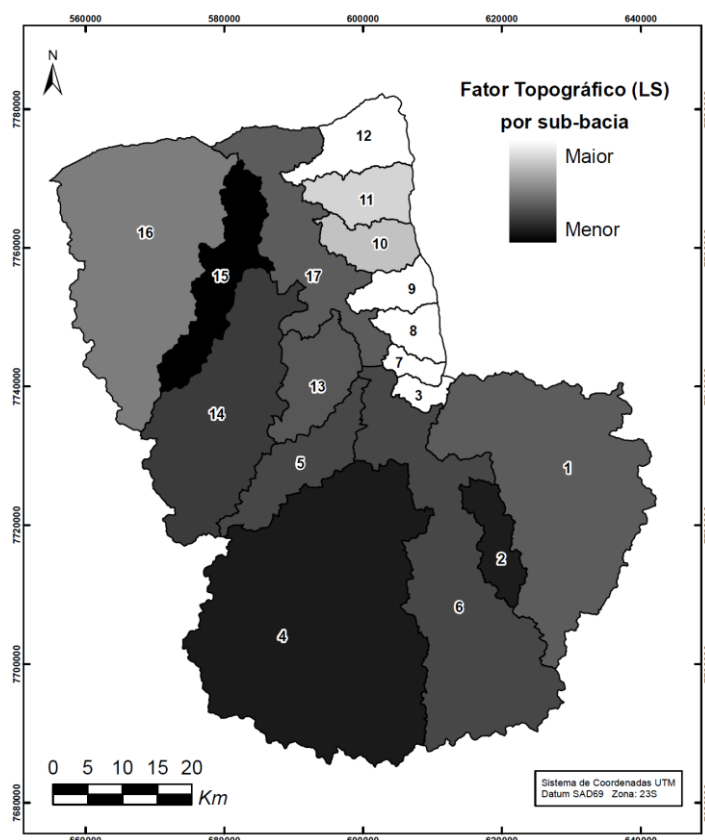


**Figura 47:** Serra da Moeda (ao fundo) nas proximidades das sub-bacias Piedade e Marinhos e (b) detalhe de escarpa nas cabeceiras da sub-bacia Marinhos.

**Tabela 24: Fator topográfico por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de Interpretação (%)						Média de LS*
				0-2	2-5	5-10	10-20	20-40	> 40	
Barra	Médio	8	57,5	3,6	4,7	9,6	20,8	30,8	30,5	<b>37,1</b>
Contendas	Médio	9	65	4,2	5,3	10,3	22,0	31,5	26,6	<b>32,6</b>
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	3,8	5,5	11,8	24,8	31,4	22,7	<b>30,2</b>
Moreiras	Alto	3	28,9	5,8	10,7	17,2	25,9	23,9	16,5	<b>25,3</b>
Casa Branca	Médio	12	125,0	8,9	12,0	18,1	23,8	20,3	16,8	<b>23,8</b>
Piedade	Médio	11	104,4	9,6	13,0	20,2	26,5	19,0	11,7	<b>21,5</b>
Marinhos	Médio	10	86,8	8,4	11,6	18,7	27,3	23,3	10,8	<b>20,4</b>
Manso	Médio	16	674,3	10,5	13,0	21,1	28,1	19,2	8,0	<b>16,6</b>
Vale Médio	Médio	17	304,8	13,6	14,2	22,1	26,4	16,6	6,9	<b>14,9</b>
Maranhão	Alto	1	723,1	12,4	13,7	22,4	30,8	15,4	5,2	<b>14,9</b>
Cordeiros	Médio	13	147,8	8,5	12,5	23,2	31,5	19,5	4,8	<b>14,6</b>
Vale Alto	Alto	6	658,2	11,4	13,6	22,9	31,5	16,3	4,2	<b>13,8</b>
Paivas	Alto	5	161,2	9,9	13,7	24,2	31,0	17,2	3,9	<b>13,7</b>
Macaúbas	Médio	14	477,2	10,7	14,0	24,4	31,3	16,0	3,5	<b>13,1</b>
Pequeri	Alto	2	86,8	10,9	14,5	23,9	36,0	14,1	0,6	<b>11,4</b>
Camapuã	Alto	4	1106,0	13,5	16,6	26,2	29,6	12,1	2,1	<b>11,2</b>
Águas Claras	Médio	15	182,2	13,7	19,5	29,4	27,4	8,7	1,3	<b>9,8</b>

\*adimensional



**Figura 48:** Mapa de LS por sub-bacia

A transição das cabeceiras do trecho norte da Serra da Moeda com uma área deprimida, que se estende até o leito do rio Paraopeba, é marcada pela presença de esporões. Eles exibem uma morfologia de morros alinhados, situados topograficamente acima das colinas da depressão. A área deprimida em direção ao leito do rio Paraopeba apresenta colinas dissecadas, com valores de LS mais baixos em comparação com as áreas de cabeceiras. Essa área mais rebaixada é denominada de unidade geomorfológica Depressão Marginal do Alto Paraopeba (DPA) (MEDINA *et al.*, 2005).

Essa depressão se estende até o leito do rio Paraopeba e às sub-bacias dos rios Manso e Águas Claras. Kohler (2008) diferenciou essa área deprimida em dois compartimentos geomorfológicos: Paraopeba Leste, localizado na margem direita do rio, e Paraopeba Oeste, na margem esquerda. Toda essa área faz parte da Depressão Sanfranciscana (CETEC, 1983). As declividades são baixas (3-8%) e médias (8-20%), com predominância de Latossolos sobre rochas do embasamento cristalino. A sub-bacia do ribeirão Águas

Claras, situada em parte nessa área deprimida, possui 62,6%, da sua área com valores de LS abaixo de 10. É a unidade de análise menos influenciada pelo fator topográfico (Tabela 24 e Figura 48).

Parte da sub-bacia do rio Manso também está nessa área deprimida com o relevo relativamente menos favorável à erosão. Porém, na borda norte da sub-bacia as vertentes da Serra Azul (Figura 49a) possuem declividades que estão entre 50 e 70%. Entre as cidades de Itatiaiuçu e Rio Manso, também há uma área topograficamente elevada, porém com declividades um pouco mais baixas, que vão até 30%. Nessa sub-bacia, aproximadamente 27% dos valores de LS são acima de 20.



**Figura 49:** (a) Vertentes com altas declividades na Serra Azul e (b) nas sub-bacias Contendas e Barra

Na sub-bacia do ribeirão Casa Branca ocorrem imponentes espigões, com vertentes íngremes que mergulham do platô Moeda em direção ao vale do ribeirão Catarina. Os desnivelamentos das vertentes variam entre 200 e 350 m, com declividades entre 50 e 70%. Esses espigões são delimitados bruscamente pela Serra de Ouro Fino (Figura 50a), que está instalada sobre rochas quartzíticas. Toda essa área, incluindo a Serra dos Três Irmãos (Figura 50b), é bastante suscetível à erosão laminar devido ao relevo acidentado. Os valores de LS são maiores do que 100 em algumas encostas.



**Figura 50:** (a) Escarpas sobre quartzitos na Serra de Ouro Fino e (b) vertentes com alta declividade na Serra dos Três Irmãos.

Destacam-se também as unidades de análise 3, 7, 8 e 9 que, além da influência da Serra da Moeda, apresentam morros e picos acentuados nos divisores de água entre as sub-bacias (Figura 49b). Esses divisores possuem picos com cotas altimétricas superiores a 1.200 m e fundos de vale com aproximadamente 800m. Nesses locais os valores do fator LS estão acima de 40. São as sub-bacias mais influenciadas pelo fator topográfico, em média.

Na região do Alto Paraopeba, as áreas com os valores mais altos de LS estão nas escarpas da Serra de Ouro Branco, na sub-bacia do rio Maranhão, em que as declividades são superiores a 100%. No vale do Alto e na sub-bacia do rio Camapuã, os locais com LS mais altos estão na Serra do Camapuã e próximo à Jeceaba, e também nos divisores com a sub-bacia do ribeirão dos Paivas.

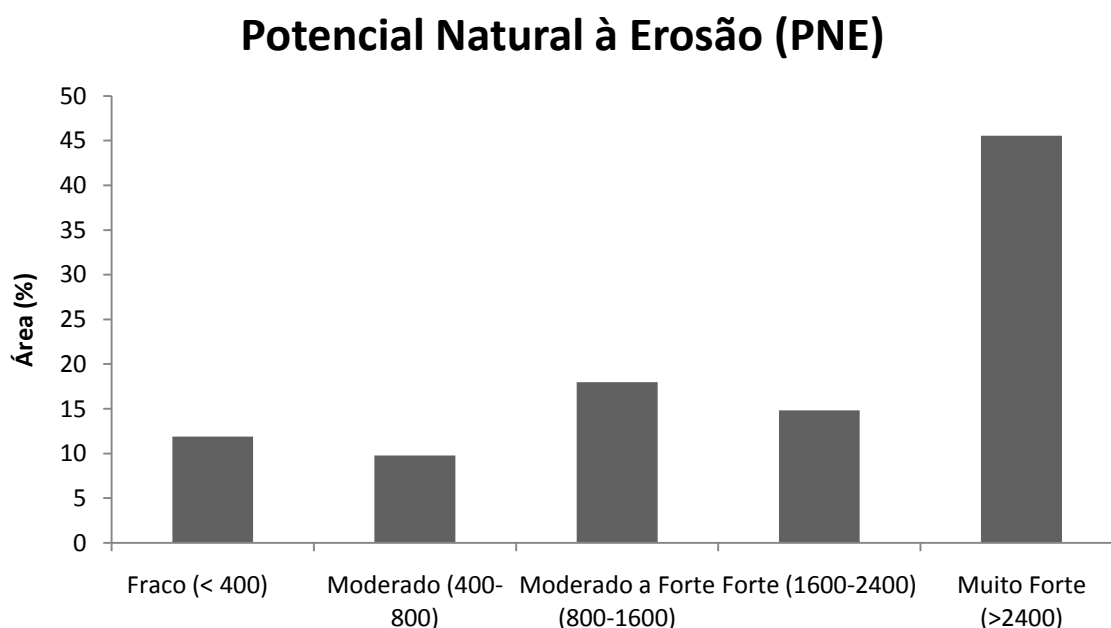
O **Potencial Natural à Erosão (PNE)** representa a interação dos principais fatores naturais do meio físico intervenientes no processo de erosão laminar. Corresponde às perdas de solo simuladas pela EUPS, desconsiderando qualquer tipo de cobertura vegetal e de interferência antrópica.

É possível observar na Tabela 25 e Figura 51, por meio de uma chave de interpretação adaptada de Valério Filho (1994), que mais de 60% da área de estudo tem PNE forte ou muito forte. Os valores obtidos são influenciados principalmente pelos fatores LS e K. As combinações do relevo movimentado com a presença de Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos ou Argissolos são os principais condicionantes para o elevado potencial natural à erosão laminar. As áreas com predominância de Latossolos sobre relevo suave são menos

vulneráveis à erosão hídrica. Apenas em 21,7% da área de estudo o PNE é fraco ou moderado.

**Tabela 25: Distribuição do Potencial Natural à Erosão em classes de interpretação**

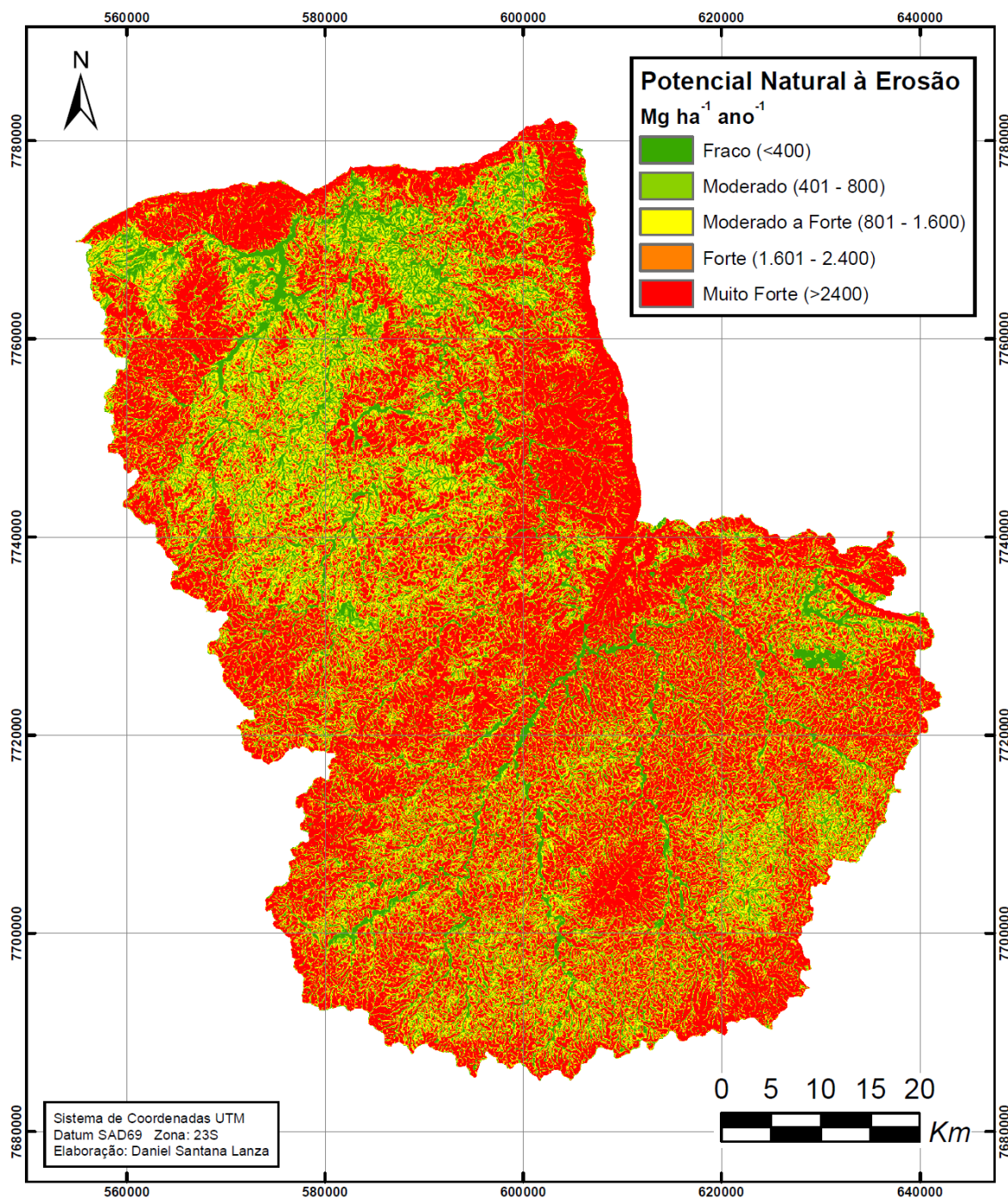
Classes de Interpretação	Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	Área (%)
Fraco	< 400	11,9
Moderado	400-800	9,8
Moderado a Forte	800-1600	18,0
Forte	1600-2400	14,8
Muito Forte	>2400	45,5



**Figura 51:** Representação gráfica do Potencial Natural à Erosão em classes de interpretação

Em todo o complexo serrano do Quadrilátero Ferrífero há forte PNE (Figura 52). São vertentes com declividades muito altas e com ocorrência de Neossolos Litólicos e Cambissolos. No Alto Paraopeba, entre o vale e a sub-bacia do rio Camapuã, ocorre uma área topograficamente mais elevada, denominada de Serra do Camapuã. A alta vulnerabilidade erosiva é caracterizada pela presença de Neossolos Litólicos sobre superfícies declivosas. Nas nascentes do rio Paraopeba, próximo a Cristiano Otoni, também ocorre uma área com valores elevados de LS, mas com ocorrência predominante

de Cambissolos Háplicos. O mesmo quadro é observado entre as sub-bacias dos rios Camapuã e Paivas. Entre os municípios de Itatiaiuçu e Rio Manso há uma área com valores elevados de LS e ocorrência predominante de Argissolos.



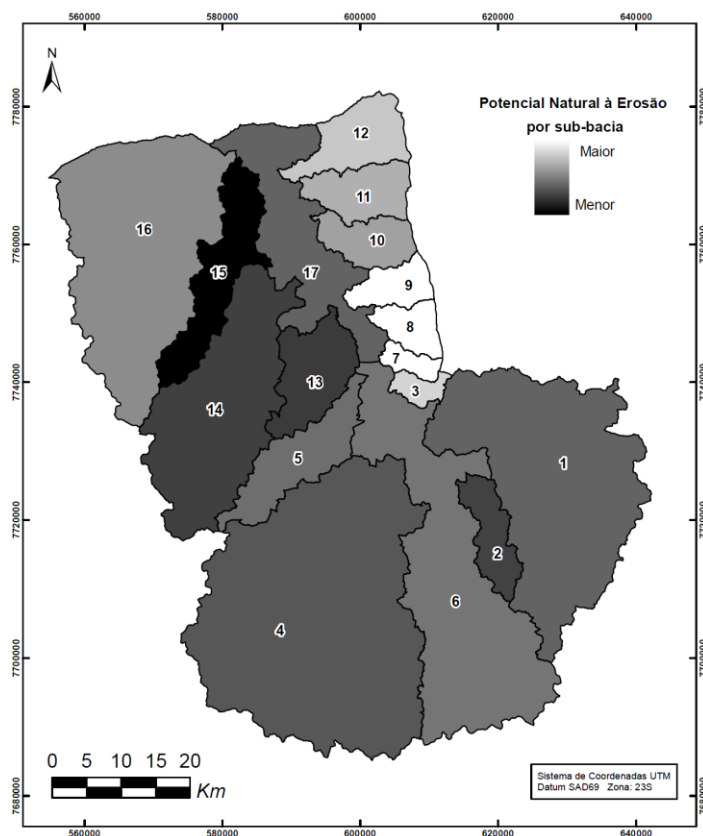
**Figura 52:** Mapa do Potencial Natural à Erosão

Na Tabela 26 e Figura 53 é possível observar que as sub-bacias com maior PNE são as 7, 8 e 9, em que mais de 87% da área possui forte ou muito forte potencial de ocorrência de

erosão. Todas as demais unidades de análise apresentam mais da metade da área com PNE forte ou muito forte, exceto a sub-bacia do ribeirão Águas Claras.

**Tabela 26: Potencial Natural à Erosão por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de interpretação (%)				
				Fraco	Moderado	Moderado a Forte	Forte	Muito Forte
Barra	Médio	8	57,5	2,8	2,1	4,7	5,6	84,8
Contendas	Médio	9	65,0	3,4	2,8	6,0	6,7	81,2
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	3,0	2,5	5,7	6,9	81,9
Moreiras	Alto	3	28,9	6,8	8,3	16,4	13,5	54,9
Casa Branca	Médio	12	125,0	13,2	11,6	17,0	11,1	47,2
Piedade	Médio	11	104,4	10,9	10,1	18,0	13,8	47,3
Marinhos	Médio	10	86,8	8,7	8,0	16,0	13,8	53,5
Manso	Médio	16	674,3	13,3	11,0	18,4	12,9	44,4
Vale Alto	Alto	6	658,2	10,2	7,9	15,7	14,9	51,4
Paivas	Alto	5	161,2	8,6	7,7	16,5	16,4	50,8
Vale Médio	Médio	17	304,8	16,9	12,1	18,7	12,6	39,8
Maranhão	Alto	1	723,1	12,0	8,7	16,9	15,4	46,9
Camapuã	Alto	4	1106,0	11,1	8,9	17,5	16,4	46,0
Pequeri	Alto	2	86,8	10,3	9,2	18,1	17,0	45,4
Macaúbas	Médio	14	477,2	12,3	11,2	21,4	16,7	38,3
Cordeiros	Médio	13	147,8	11,2	11,4	23,8	17,6	35,9
Águas Claras	Médio	15	182,2	21,3	19,9	30,6	14,3	13,9



**Figura 53:** Mapa do PNE por sub-bacia

Os resultados obtidos indicam que os valores de PNE são relativamente altos quando comparados a outros estudos desenvolvidos na bacia do rio São Francisco e no Brasil. Segundo Borges (2009), somente 3,71% da área da bacia do rio Carinhanha (médio São Francisco) tem PNE acima de  $400 \text{ Mg. ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Para Mata (2009), 29,1% da área da bacia do rio Urucuia, também no médio São Francisco, possui valores acima de  $400 \text{ Mg. ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Silva (2008) avaliou o PNE no município de Sorocaba-SP e 15,2% de ocorrência das perdas de solo estão acima de  $1.600 \text{ Mg. ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Miguel (2010) aplicou a EUPS em Santa Maria-RS e somente 22% dos valores de PNE obtidos são acima de  $1.000 \text{ Mg. ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Na área de estudo, 88,1% dos valores estão acima de 400; 78,4% dos valores estão acima de 800 e 60,4 % estão acima de  $1.600 \text{ Mg. ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . É a bacia com maior PNE de todas as supracitadas.

Apesar de não serem contemplados pela EUPS, os fatores ligados ao arranjo litológico e estrutural do relevo também fornecem informações importantes, principalmente para o entendimento da gênese da suscetibilidade natural à erosão na área de estudo. Há um consenso, entre diversos autores, que o encaixamento do vale do rio Paraopeba é consequência de pulsos neotectônicos de soerguimento regional da borda sul do cráton do



São Francisco (MOREIRA, 1992; MARQUES, 1997; MEDINA *et al.*, 2005; VARAJÃO *et al.*, 2009). Esse ‘input’ de energia favoreceu o desenvolvimento de processos morfogênicos e erosivos em toda essa região.

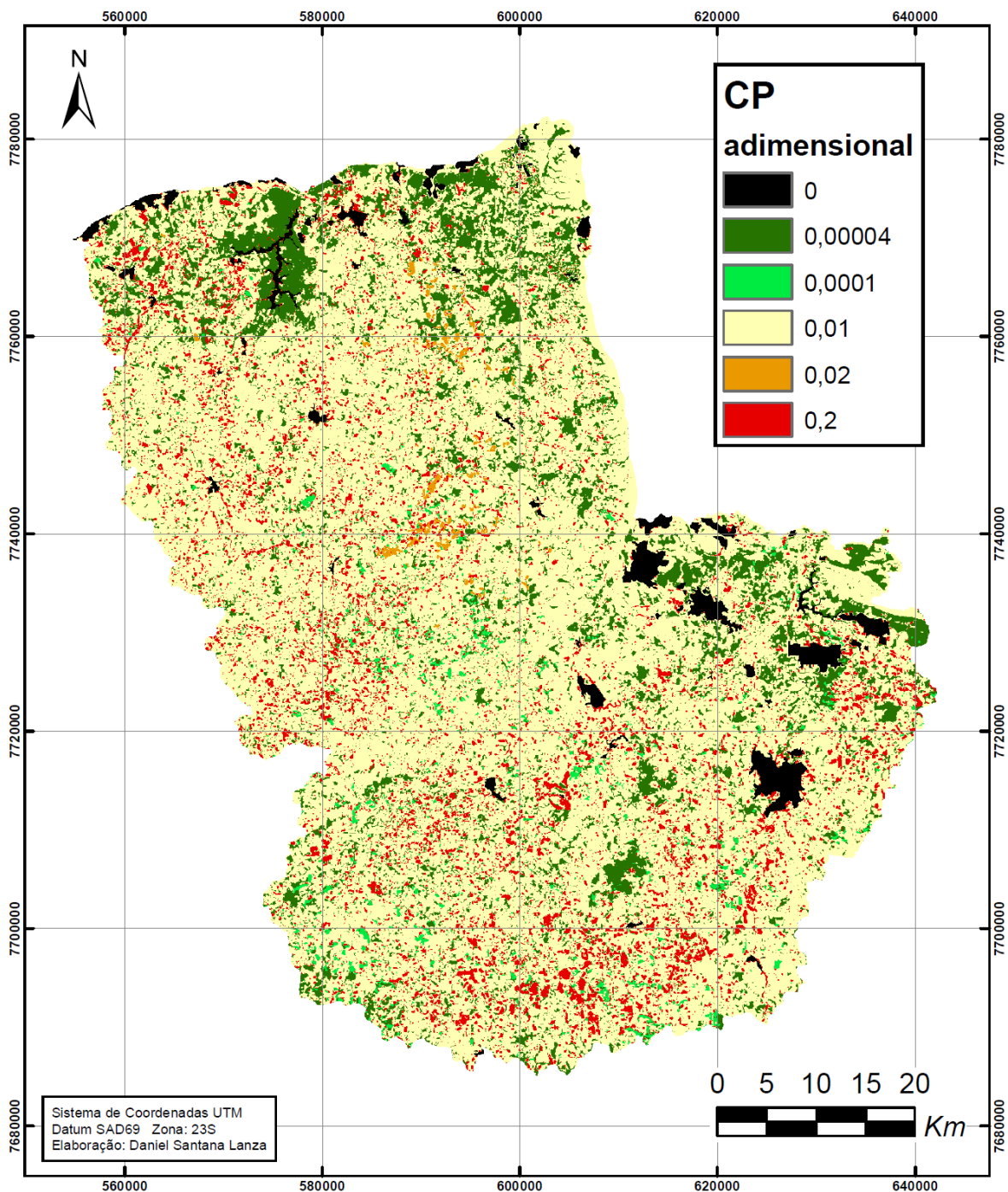
### 5.3 Potencial Atual à Erosão (Ea)

O fator cobertura e manejo e práticas conservacionistas (CP) significa a relação entre as perdas em um solo mantido descoberto com outro com determinado tipo de uso e cobertura. É representado pelo mapa de UCS e na área de estudo possui valores que variam entre 0 e 0,2, segundo a classificação de Stein *et al.* (1987). (Tabela 27 e Figura 54)

**Tabela 27: Distribuição dos valores de CP**

CLASSES DE UCS	CLASSES DE CP*	ÁREA (%)
Água, Áreas Construídas e Mineração	0	3,2
Vegetação Arbórea	0,00004	22,7
Silvicultura	0,0001	2,2
Veg. Campestre e Pastagem	0,01	67,1
Cultura Permanente	0,02	0,3
Cultura Temporária	0,2	4,4

\*adimensional



**Figura 54:** Mapa do fator CP

Para as áreas construídas (urbana e indústria), mineração e corpos de água, o valor nulo de CP foi adotado. As áreas construídas e a mineração possuem a superfície muito modificada como, por exemplo, pavimentação, edificação, ou remoção do solo. Levando isso em consideração, limita-se a análise do potencial de erosão laminar pela EUPS somente para as demais classes de UCS.

A vegetação arbórea florestal é o tipo de cobertura que mais protege o solo da ação dos agentes erosivos. Há um predomínio de espécies da Floresta Estacional Semidecidual, que são indivíduos que atingem até 20m de altura e a copa das árvores possui alta densidade. Segundo Martins *et al.* (2010), a floresta nativa também produz uma rica camada de serrapilheira, que proporciona benefícios na proteção do solo (Figura 55). A camada de resíduos vegetais favorece a infiltração da água e a diminuição do escoamento superficial, além de incorporar matéria orgânica ao solo.

As áreas mais preservadas da bacia estão localizadas na Serra do Camapuã, no entorno da represa do rio Manso e nas sub-bacias dos ribeirões Casa Branca e Piedade. Nas demais áreas, a vegetação arbórea se encontra bastante fragmentada em estreitas faixas de vegetação ribeirinha, capões de mata e capoeiras.



**Figura 55:** Exemplo de serrapilheira formada a partir de resíduos vegetais em uma Mata Secundária na sub-bacia do ribeirão Piedade

A vegetação campestre, apesar de proteger menos o solo em comparação à vegetação arbórea, é também eficiente e importante no controle da erosão. Esse tipo de vegetação ocorre sobre solos bastante frágeis e com a topografia acidentada. São áreas caracterizadas pela erosão muito mais intensa do que pedogênese. Portanto, as gramíneas naturais e os arbustos atuam no controle da erosão laminar acelerada, promovendo a estabilidade das vertentes.

As áreas de agricultura possuem valores de CP que variam entre 0,0001 e 0,2. A silvicultura é considerada a prática agrícola mais sustentável, levando-se em consideração o controle da erosão. As lavouras temporárias são, em média, as mais suscetíveis. Nas áreas de

agricultura, as práticas de manejo exercem um papel importante de sustentabilidade entre a produção agrícola e o equilíbrio do ecossistema.

A silvicultura está presente em grande parte da área de estudo e ocupa aproximadamente a metade da área de cultura temporária. Segundo Santos (2009), o estado de Minas Gerais lidera o *ranking* nacional da produção de madeira por floresta plantada, representando 29% do total do país. Esse crescimento ainda tende a aumentar, levando-se em consideração os investimentos previstos para os próximos anos. Segundo o autor, esse recurso tem se constituído uma boa alternativa para evitar o desmatamento de florestas nativas, pelo fato de atender à demanda por carvão vegetal.

Segundo Cardoso *et al.* (2004), apesar de as áreas de reflorestamento apresentarem bom grau de cobertura, as perdas são maiores quando comparadas à vegetação nativa. Os autores ainda destacam que durante o passar dos anos ocorre uma tendência de diminuição das perdas de solo em plantios de eucalipto, devido ao tempo necessário para o crescimento das árvores. Na fase mais madura do ciclo da espécie, as copas das árvores ficam praticamente entrelaçadas umas às outras, formando um dossel fechado e com alta densidade de folhas. Além disso, também há o acúmulo da serrapilheira, que protege o solo pela interceptação e dissipação da energia das gotas de chuva. A exploração rotacional do eucalipto dura aproximadamente sete anos.

Entretanto, é importante a adoção de sistemas de preparo e manejo adequados para evitar a degradação do solo, principalmente na fase de preparo da terra e durante os primeiros anos do cultivo. Em estudo realizado em parcelas experimentais, em diferentes sistemas de manejo de eucalipto, Pires *et al.* (2006) constataram que as perdas de solo em plantio em nível são menores do que quando plantados no sentido do declive (Figura 56a). Além disso, a retirada e a queda dos indivíduos durante a colheita promovem a compactação do solo, e a queima dos restos culturais (Figura 56b), prática muito comum entre os produtores de madeira, faz aumentar as perdas de solo.



**Figura 56:** Sistemas de manejo de eucalipto (a) plantado no sentido do declive na sub-bacia Camapuã com e (b) queima de restos culturais no leito do Alto Paraopeba.

No caso da pastagem, há um predomínio da pecuária extensiva, porém com uma diversidade de condições de rebanho e capim. Em alguns casos, não há rotação de pasto ou outra técnica de manejo que assegure a qualidade das glebas. Por isso ocorre superpastejo (Figura 57a), o que resulta na compactação do solo e na diminuição da capacidade de infiltração da água. Entretanto, há também, em muitas áreas, pastos com cobertura densa de gramíneas junto à presença de arbustos, evidenciando boa proteção do solo (Figura 57b). De acordo com Silva *et al.* (2010), a pastagem deve ser manejada sempre dentro de sua capacidade de suporte. Deve haver o controle da lotação máxima de animais, de acordo com o rendimento da espécie forrageira.



**Figura 57:** Pastagem na sub-bacia do rio Camapuã apresentando (a) superpastejo e degradação através de sulcos erosivos e (b) com cobertura total de gramíneas e vegetação preservada em topo de morro.

Entre as outras duas categorias de agricultura mapeadas, a agricultura permanente protege mais o solo em comparação à agricultura temporária. Nas culturas perenes, a cobertura do

solo ocorre durante todo o ano. Além disso, não há necessidade de preparo e movimentação do solo por um período mais longo, diminuindo sua exposição direta aos agentes da erosão. A aceleração do processo é favorecida quando as fileiras não são plantadas em nível. Outro fator influente nas perdas de solo em pomares é a densidade do revestimento do solo, com vegetação herbácea entre as plantas (Figura 58). Quando a cobertura com esse revestimento é maior, as perdas também tendem a diminuir (POLITANO e PISSARA, 2005).



**Figura 58:** Pomares de mexerica apresentando (a) cobertura quase total e (b) cobertura parcial de gramíneas entre as plantas na sub-bacia do ribeirão Cordeiros.

Nas lavouras temporárias ou anuais, em alguns períodos do ano não há cobertura do solo devido à entressafra. O solo exposto é a pior situação possível e que resulta nas mais altas taxas de perdas de solo. Por isso, a vulnerabilidade à erosão das áreas com agricultura temporária é bastante alta, mais ainda quando não há adoção de sistemas de preparo e manejo sustentáveis. Os métodos de preparo do solo exercem um papel importante nessa categoria de agricultura, principalmente devido à frequência em que são efetuadas as interferências no solo.

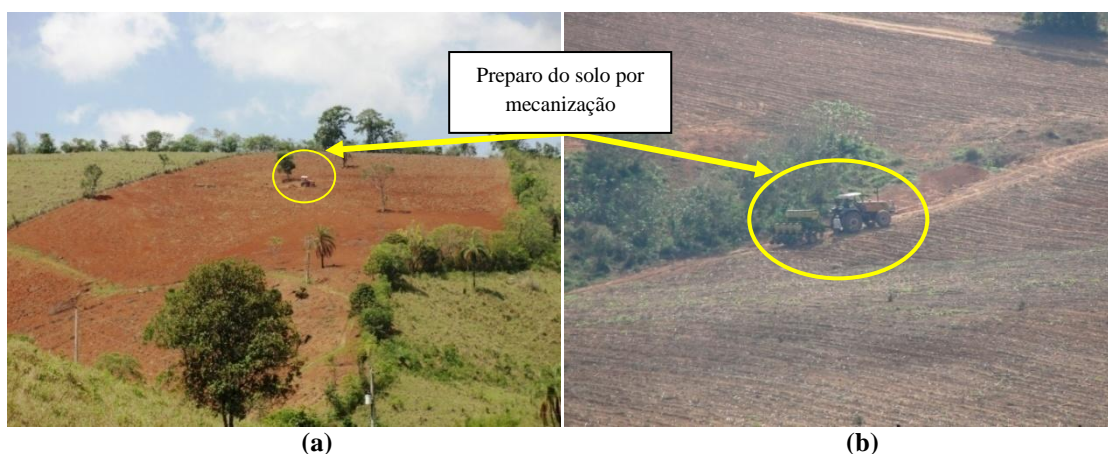
Schick *et al.* (2000) fizeram experimentos em parcelas padrão sob três sistemas de preparo do solo: a) aração + duas gradagens, b) escarificação + gradagem e c) semeadura direta. Os resultados revelaram que as perdas de solo no sistema convencional<sup>14</sup> apresentaram perdas de 1,5 a 3 vezes maiores do que nos outros sistemas de preparo. Amaral *et al.* (2008) fizeram experimentos sob sistemas de manejo semelhantes aos de Shick *et al.* (2000).

---

<sup>14</sup> O sistema convencional de preparo do solo consiste na realização de uma aração, caracterizado pelo preparo primário do solo, seguida de duas gradagens para destorroamento e nivelamento (DREPSCH *et al.*, 1991).

Porém, os resultados indicaram diferenças maiores ainda. O sistema de preparo de semeadura direta apresentou perdas de solo em média de  $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , enquanto no sistema convencional (primário) as perdas foram de  $10,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Em ambos os experimentos os resultados revelaram que o sistema de preparo é um fator importante na redução da erosão hídrica. A eficácia da semeadura direta provém do fato de que os resíduos culturais permanecem na superfície do solo, promovendo uma cobertura de proteção, mesmo após a colheita.

Na área de estudo, não foi possível diferenciar com detalhamento os métodos de preparo do solo empregados, devido à grande extensão territorial da bacia. Porém, ficou constatado pelos trabalhos de campo e em conversas com os agricultores que o sistema de preparo mais adotado é o convencional. A aração do solo muitas vezes é feita por mecanização (Figura 59), o que modifica significativamente as características físicas das camadas superficiais do solo (Figura 60). Segundo Mesquita *et al.* (2008), o tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas induz a compactação e a perda de espaços porosos no solo, o que pode proporcionar a diminuição da capacidade de infiltração da água e levar ao aumento da erosão.



**Figura 59:** Foto de aração do solo por mecanização nas sub-bacias (a) Manso e (b) Camapuã



**Figura 60:** O preparo primário deixa a superfície do solo fragmentada e mais exposta à ação direta da chuva. Foto nas sub-bacias do (a) Camapuã e (b) Macaúbas.

Adicionalmente, técnicos da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (EMATER) informaram que, apesar de os sistemas predominantes de preparo e manejo do solo serem os convencionais, alguns agricultores fazem a semeadura direta nas lavouras de milho. Por outro lado, alguns pecuaristas adotam o sistema rotacional da pastagem, para não pressionar excessivamente uma gleba com atividade pastoreia. Contudo, outros proprietários ainda preferem utilizar o fogo para a rebrota do capim.

Além disso, foi constatado, por meio da interpretação de imagens de satélite e em trabalho de campo, que as áreas de agricultura temporária apresentam solo exposto principalmente em agosto/setembro/outubro. Devido às evidências de exposição do solo no período em que ocorrem as primeiras chuvas (setembro e outubro), é importante a adoção de métodos de preparo e manejo, para a amenização das perdas de solo nessa época do ano. Quando as glebas de lavouras apresentam solo exposto no período em que há maior concentração de chuva (dezembro e janeiro), a erosão e as perdas de solo são ainda mais intensas.

Na Tabela 28 e Figura 61, observa-se que as sub-bacias do rio Camapuã e o vale do Alto Paraopeba são as unidades de análise com os valores médios mais altos de CP. Há uma grande quantidade de propriedades rurais com agricultura temporária. Já as sub-bacias da margem direita do Médio Paraopeba são as áreas com os valores mais baixos de CP, principalmente devido às áreas conservadas com vegetação arbórea.



**Tabela 28: Fator CP por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de Interpretação (%)						Média de CP
				0	0,00004	0,0001	0,01	0,02	0,2	
Camapuã	Alto	4	1106,0	0,6	19,2	4,0	70,0	0,0	6,2	<b>0,0194</b>
Vale Alto	Alto	6	658,2	1,4	18,1	3,3	71,8	0,1	5,4	<b>0,0179</b>
Macaúbas	Médio	14	477,2	0,2	14,6	2,4	77,5	0,3	5,0	<b>0,0179</b>
Pequeri	Alto	2	86,8	0,3	18,4	0,9	75,6	0,0	4,8	<b>0,0171</b>
Cordeiros	Médio	13	147,8	0,0	17,8	3,0	70,7	4,2	4,3	<b>0,0166</b>
Águas Claras	Médio	15	182,2	2,1	16,6	0,4	76,6	0,2	4,1	<b>0,0159</b>
Manso	Médio	16	674,3	4,3	27,9	0,7	62,8	0,1	4,3	<b>0,0150</b>
Paivas	Alto	5	161,2	0,0	18,1	6,9	70,9	0,5	3,6	<b>0,0144</b>
Maranhão	Alto	1	723,1	11,4	25,0	1,2	58,7	0,0	3,7	<b>0,0134</b>
Vale Médio	Médio	17	304,8	4,9	30,2	0,1	60,5	1,9	2,4	<b>0,0112</b>
Barra	Médio	8	57,5	0,1	24,3	0,1	73,9	0,1	1,7	<b>0,0107</b>
Marinhos	Médio	10	86,8	0,1	32,7	0,4	64,2	0,8	1,8	<b>0,0103</b>
Contendas	Médio	9	65,0	1,3	28,6	0,8	67,8	0,0	1,5	<b>0,0099</b>
Moreiras	Alto	3	28,9	6,9	17,3	0,3	74,4	0,0	1,1	<b>0,0097</b>
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	0,1	29,5	2,1	66,9	0,0	1,5	<b>0,0096</b>
Casa Branca	Médio	12	125,0	4,6	40,0	0,1	54,4	0,0	0,9	<b>0,0073</b>
Piedade	Médio	11	104,4	3,7	50,7	0,5	43,7	0,1	1,3	<b>0,0070</b>

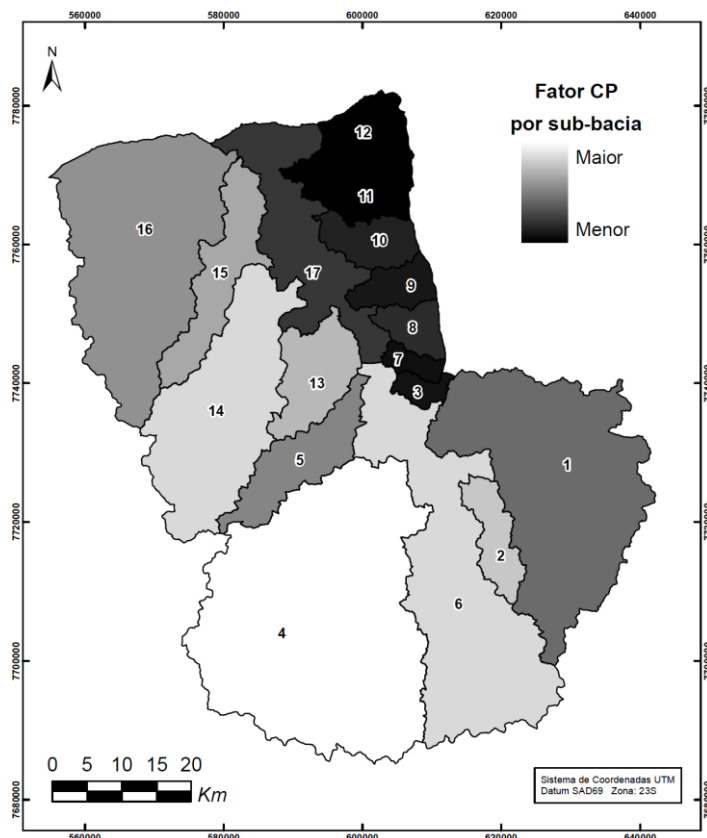


Figura 61: Mapa de CP por sub-bacia

O **Potencial Atual à Erosão (Ea)** representa as perdas de solo por erosão laminar considerando o produto do PNE e CP. Devido às considerações já mencionadas sobre a aplicação da EUPS em grandes áreas, os resultados serão interpretados por meio de abordagem qualitativa do potencial à ocorrência de erosão laminar. Nesse sentido, Carvalho (1994) propôs uma chave de interpretação das perdas de solo que vão desde nula a muito forte. Essa proposta de classificação também foi utilizada por Mata (2009) e Borges (2009), que aplicaram a EUPS para outras sub-bacias do rio São Francisco.

A erosão laminar é nula ou pequena em 45,8% da área de estudo (Tabela 29). É possível perceber na Figura 62 e no Anexo III que são as áreas com relevo suave a ondulado que desenvolvem solos profundos e mais resistentes à erosão. Correspondem a uma área deprimida pertencente à Depressão Sanfranciscana, e também às várzeas próximas ao leito de alguns cursos de água. Nos locais cobertos por vegetação arbórea o risco de erosão laminar também é pequeno. Nas áreas construídas, mineração e corpos de água, a erosão foi considerada nula.

**Tabela 29: Distribuição de classes de Potencial Atual à Erosão (Ea)**

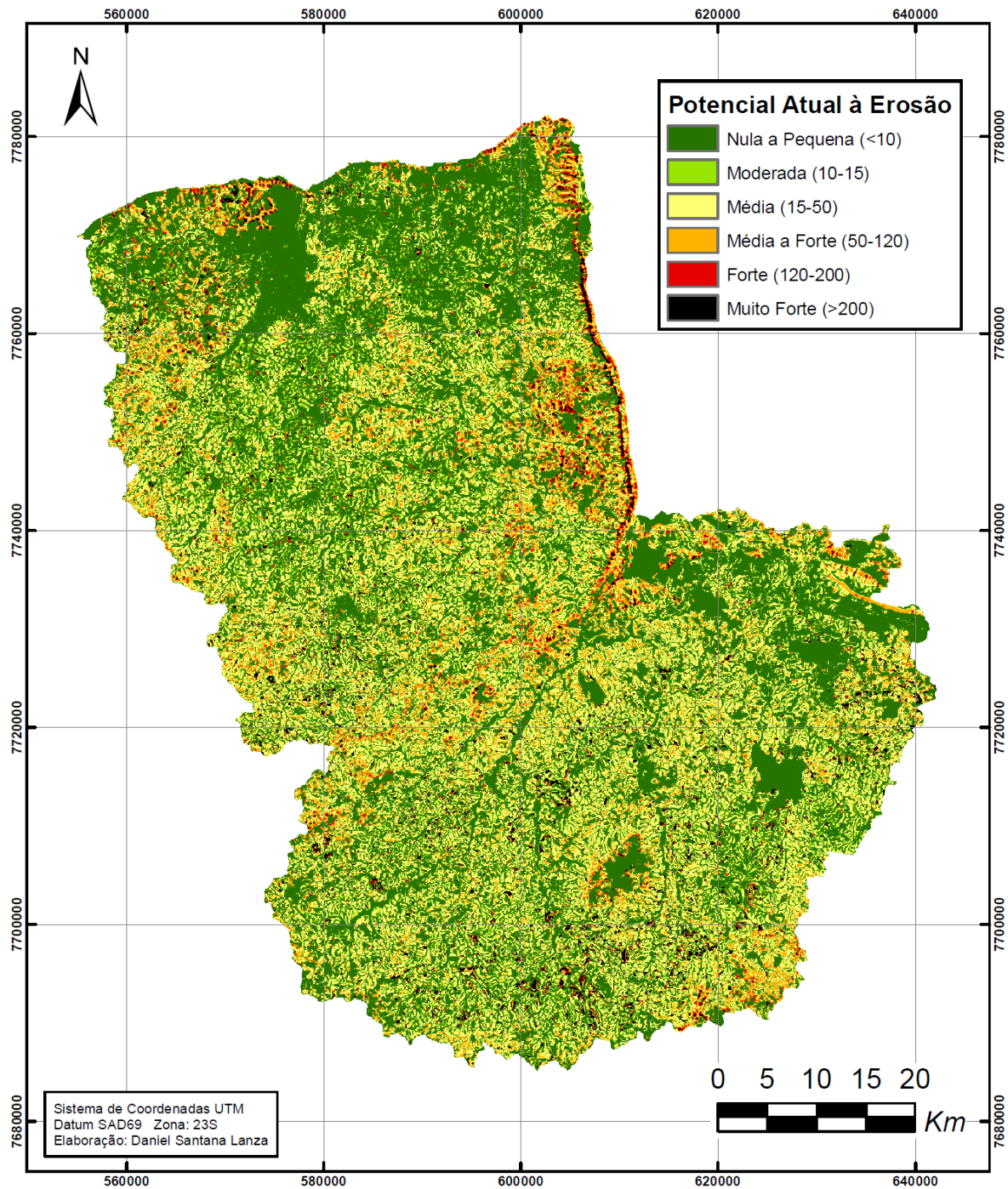
<b>Valores de Perdas de Solo*</b>	<b>Classes de Interpretação</b>	<b>Área (%)</b>
<10	Nula a Pequena	45,8
10--15	Moderada	7,8
15--50	Média	30,7
50--120	Média a Forte	10,3
120--200	Forte	2,0
>200	Muito Forte	3,4

\*Mg. ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>

As classes de interpretação moderada e média ocorrem distribuídas por toda a bacia de estudo. Ocupam juntas 38,5% da área estudada. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), a tolerância<sup>15</sup> de perdas de solo das classes de solos típicas do Brasil tem uma média aproximada de 10 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A utilização desse indicador em bacias hidrográficas com diversos tipos de solos deve ser feita com ressalvas. Isso porque os valores variam de acordo com a classe de solo. Entretanto, o valor médio estabelecido é considerado uma referência e foi utilizado nos estudos de Chaves (1994) e Silva (2004b). O total de 54,2% da área de estudo possui perdas acima do limite médio de tolerância.

---

<sup>15</sup> A tolerância é um indicador que representa a quantidade de solo que pode ser perdida desde que seja mantida sua produtividade agrícola por um longo período.



**Figura 62:** Mapa de Potencial Atual à Erosão (Ea)

O potencial à erosão laminar é de média a forte em 10,3% da área de estudo. Nota-se que há uma forte correlação com áreas com PNE alto, condicionadas principalmente pela influência de LS e K.

A erosão é considerada forte ou muito forte em 5,4% da área de estudo. A influência do UCS é destacada principalmente em toda a região do Alto Paraopeba e nas sub-bacias dos rios Macaúbas e Manso. Estão entre as unidades de análise com maior ocorrência da classe cultura temporária e que possuem os valores maiores de CP. Entretanto, alguns *pixels* com valores intermediários de CP (pastagem e vegetação campestre), após o cruzamento com os demais fatores da EUPS, resultaram em Ea forte a muito forte. Os fatores do meio físico, principalmente as altas declividades nos complexos serranos, são também bastante influentes no resultado final.

Segundo Chaves (1994), cerca de 15% da bacia do rio São Francisco possuem perdas de solo acima de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Na bacia do rio Urucuia, no médio São Francisco, 31,13% da área têm perdas acima de  $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (MATA, 2009). Ruhoff *et al.* (2006) estimaram que 72% da área da bacia do Arroio Grande possuem perdas de solo entre 2,5 e  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Esses estudos possuem taxas de perda de solos abaixo da área de estudo. Entretanto, Silva *et al.* (2009b) estimaram que 35% da área da bacia do rio Capiá possuem perdas de solo acima de  $40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Silva (2004b) concluiu que 67,2% da bacia do rio Paracatu estão acima de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Já Ribeiro e Alves (2007) encontraram valores mais altos ainda, sendo que 73,38% da área estimada no município de Campos dos Goytacazes – RJ estão acima do limite de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . São áreas mais frágeis à erosão quando comparadas à área de estudo, de acordo com as simulações feitas com a EUPS.

As áreas mais vulneráveis à ocorrência da erosão laminar acelerada na alta e média bacia do rio Paraopeba são: (i) cabeceiras dos rios Paraopeba, Camapuã e Maranhão; (ii) bacia do rio Camapuã, entre os municípios de São Brás do Suauí e Entre-Rios de Minas; (iii) cabeceiras das sub-bacias dos Paivas e Macaúbas; (iv) encostas escarpadas das Serra da Moeda e Três Irmãos; (v) sub-bacias Contendas e Barra; (vi) sub-bacia do rio Manso próximo à Serra Azul.

Oliveira *et al.* (1978) identificaram que as cabeceiras das sub-bacias do Alto Paraopeba são bastante suscetíveis à erosão acelerada. Analogamente, os resultados de Ea gerados pela EUPS apontam um alto potencial de perdas de solo. Os principais fatores influentes são a alta erodibilidade dos Cambissolos e o uso inadequado da terra. Além dos focos de erosão em lençol, também ocorrem focos de erosão linear como, por exemplo, voçorocamentos. Muitas vezes essas duas formas erosivas ocorrem lado a lado (Figura 63).



**Figura 63:** Foto de área degradada apresentando focos de erosão laminar e linear na sub-bacia do rio Camapuã

Os focos de erosão laminar acelerada ocorrem principalmente nas áreas de cultura temporária e pastagem degradada. No período de estiagem, o capim das pastagens se torna bastante ralo, evidenciando focos de erosão acelerada em áreas com cobertura parcial do terreno. Esse fenômeno foi observado em grande parte da área de estudo, com destaque para as sub-bacias do rio Camapuã e o vale do Alto Paraopeba (Figura 64).

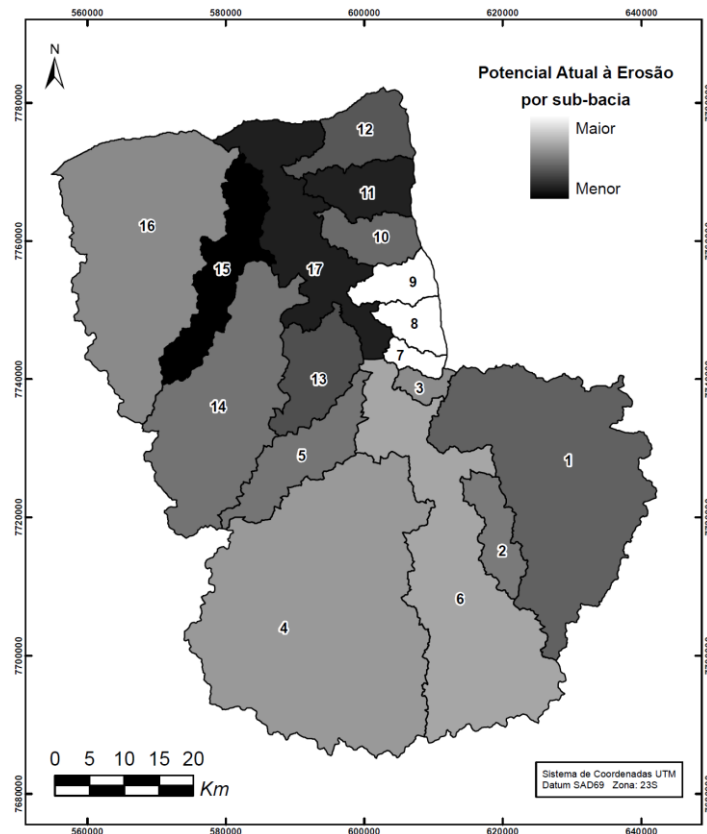


**Figura 64:** Áreas rurais degradadas evidenciando focos de erosão laminar acelerada nas colinas do Alto Paraopeba

As sub-bacias Barra, Contendas e Barra da Boa Esperança, apesar de serem as três primeiras no *ranking* da média de perdas de solo (Tabela 30 e Figura 65), não apresentam grande quantidade de focos de erosão acelerada. Isso foi constatado tanto no mapeamento elaborado por CETEC e IGA (1996), quanto na interpretação de imagens de satélite de alta resolução e evidências observadas em campo. Um dos motivos de não haver muitos focos de erosão acelerada é que a vegetação nos topos de morro se encontra em bom estado de preservação. Outro fator é que a cobertura de gramíneas nas pastagens possui alta densidade. Apesar da combinação do relevo movimentado com solos frágeis favorecer a degradação do solo, a erosão predominante é não-aparente (Figura 66).

**Tabela 30: Potencial Atual à Erosão (Ea) por sub-bacia**

Sub-bacia	Região	Cód.	Área (Km <sup>2</sup> )	Classes de Interpretação (%)					
				Nula a Pequena	Moderada	Média	Média a Forte	Forte	Muito Forte
Barra	Médio	8	57,5	28,9	2,3	20,5	28,4	11,7	8,2
Contendas	Médio	9	65,0	35,9	2,7	19,8	25,4	10,0	6,2
Barra Boa Esp.	Médio	7	29,2	36,1	2,4	21,9	26,2	7,7	5,8
Vale Alto	Alto	6	658,2	38,5	7,1	35,6	12,6	2,1	4,0
Camapuã	Alto	4	1106,0	40,8	7,8	35,6	9,9	1,5	4,4
Moreiras	Alto	3	28,9	39,3	7,7	29,6	15,8	4,5	3,1
Manso	Médio	16	674,3	50,6	7,6	25,3	10,8	2,6	3,1
Pequeri	Alto	2	86,8	38,0	8,5	41,6	7,8	0,6	3,4
Paivas	Alto	5	161,2	39,6	7,5	36,4	12,2	1,4	2,9
Macaúbas	Médio	14	477,2	39,9	10,4	36,0	9,1	1,3	3,3
Marinhos	Médio	10	86,8	46,4	6,8	29,1	12,3	2,3	2,9
Maranhão	Alto	1	723,1	51,7	6,4	28,9	8,9	1,2	2,8
Casa Branca	Médio	12	125,0	59,4	5,1	15,5	12,3	5,1	2,6
Cordeiros	Médio	13	147,8	41,9	11,1	34,6	8,5	1,3	2,7
Piedade	Médio	11	104,4	67,4	5,6	17,5	5,3	1,9	2,3
Vale Médio	Médio	17	304,8	57,7	7,8	23,5	8,1	1,5	1,4
Águas Claras	Médio	15	182,2	58,3	14,5	21,8	2,8	1,1	1,6



**Figura 65:** Mapa do Potencial Atual à Erosão (Ea) por sub-bacia

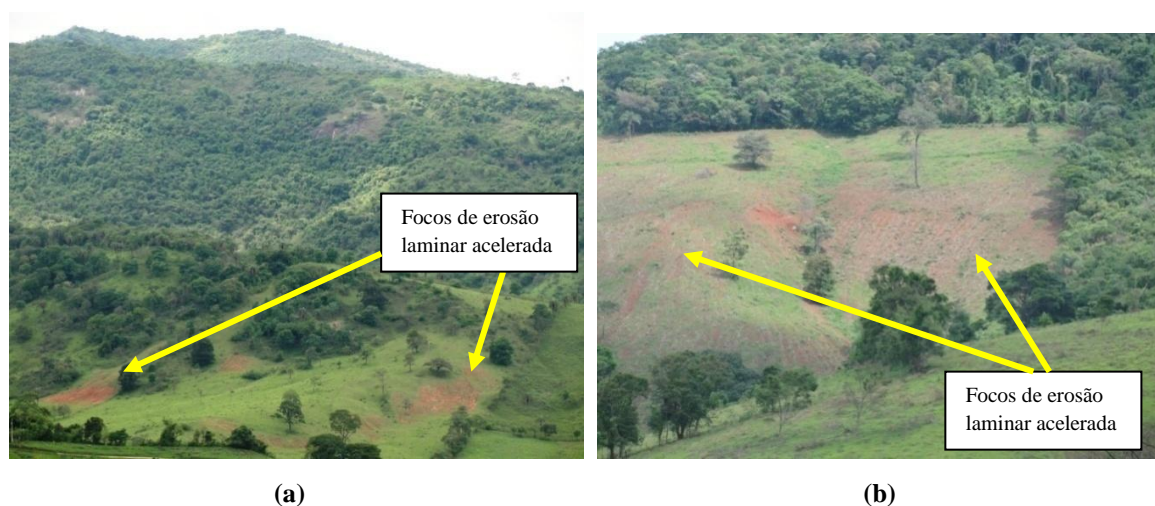


**Figura 66:** Paisagem típica da sub-bacia do ribeirão Contendas apresentando pastagem preservada com cobertura total de gramíneas e vegetação em topo de morro.

Apesar de não haver muitas evidências de feições erosivas, essas sub-bacias possuem áreas frágeis que, quando submetidas a um determinado uso do solo, apresentam alguns focos de erosão acelerada (Figura 67). Devido à fragilidade natural à erosão, é importante que haja um planejamento adequado de acordo com a capacidade de uso das terras. Essas sub-bacias também são as três com maior PNE.

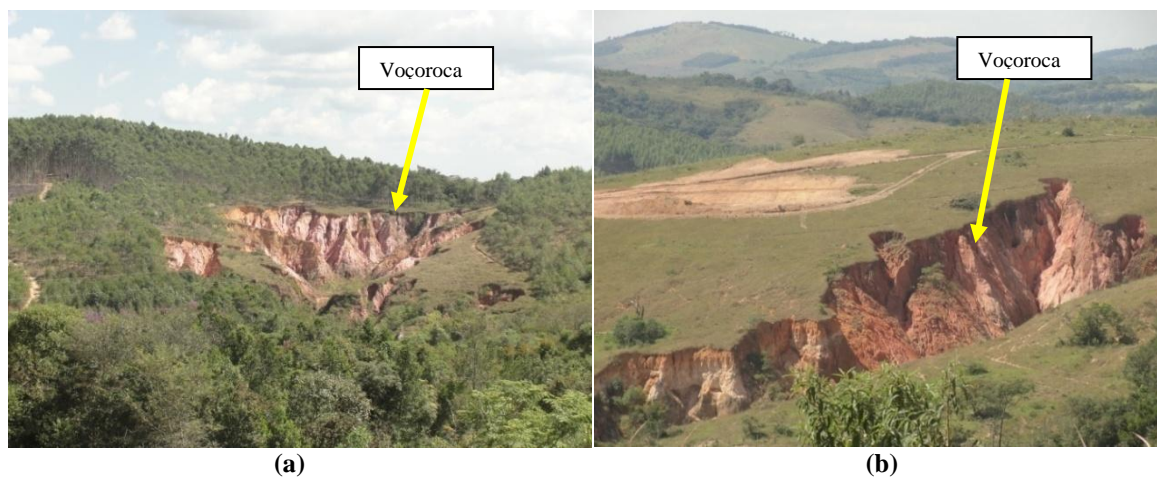


Destaca-se ainda que são as sub-bacias de menor área. Nas sub-bacias maiores como, por exemplo, todas da região do Alto Paraopeba, Manso e Macaúbas, ocorrem áreas planas nas margens dos leitos dos cursos de água que, em conjunto com associação de solos pouco erodíveis, tendem a reduzir a estimativa da média de perdas de solo. Apesar disso, essas bacias maiores também apresentam locais expressivos com potencial à erosão laminar muito forte.



**Figura 67:** Sub-bacia do ribeirão da Barra apresentando vegetação preservada ao lado de áreas com cobertura parcial do terreno evidenciado focos de erosão laminar acelerada.

Na sub-bacia do rio Macaúbas foi identificada uma grande quantidade de feições erosivas do tipo voçoroca (Figura 68), que estão concentradas em áreas de Cambissolos e com declividade máxima de 30%. O processo de erosão linear em estágio avançado requer outras abordagens de análise, pois é influenciado por fatores específicos que condicionam sua formação. Apesar disso, a presença de Cambissolos influi, devido à sua alta fragilidade diante do processo erosivo.



**Figura 68:** Duas feições erosivas do tipo voçoroca na sub-bacias do rio Macaúbas

As voçorocas observadas na sub-bacia do rio Macaúbas são ativas. Em alguns casos, os proprietários estão isolando a área e reflorestando os topos de morro. Uma limitação ao uso do eucalipto é que durante o preparo e na fase do crescimento das espécies as perdas de solo são maiores. A vegetação nativa florestal proporciona maior proteção do solo por um período mais longo. Além disso, a vegetação nativa promove benefícios para o ecossistema por ser responsável pelo incremento da biodiversidade.

Por fim, os resultados obtidos por meio da modelagem com a EUPS indicam que as sub-bacias Barra, Contendas e Barra da Boa Esperança possuem, em média, maior potencial de perda de solo. O vale do Alto Paraopeba e a sub-bacia do rio Camapuã, que estão entre as maiores unidades de análise em área, também possuem alta vulnerabilidade erosiva. Por outro lado, o vale do Médio Paraopeba e a sub-bacia do ribeirão Águas Claras são as menos suscetíveis à erosão, devido principalmente ao relevo relativamente suave e a presença predominante de Latossolos.

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta deste estudo foi de realizar um diagnóstico da erosão laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba. Para isso, os principais fatores intervenientes na erosão laminar, obtidos por meio da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), foram espacializados e multiplicados para a obtenção dos mapas do potencial natural e antópico à erosão. Os fatores de erodibilidade (K), topográfico (LS), e uso e manejo e práticas conservacionistas (CP) são os que mais exercem influência na variabilidade espacial das perdas de solo. O fator de erosividade (R) produz menos efeito, principalmente em função da extensão territorial da bacia. O efeito da chuva provavelmente seria mais notável em áreas maiores como, por exemplo, na bacia do rio São Francisco, onde a variação climática regional é mais expressiva.

Na área de estudo, há uma predominância de solos com média e alta erodibilidade, que representam o total de 84,4%. Os Cambissolos Háplicos são caracterizados por serem os mais vulneráveis à erosão. As áreas com maior erodibilidade estão nas unidades de mapeamento onde esses solos estão associados com os Neossolos Litólicos e Argissolos. A espacialização do fator K foi feita a partir do mapeamento de solos em escala de 1:250.000 que, apesar de ser adequado para estudos regionais, é limitado para análises com maior nível de detalhamento. Por isso, mapeamentos de solo mais detalhados são necessários caso a EUPS for aplicada em uma escala maior como, por exemplo, para microbacias.

O fator topográfico é bastante influente no resultado final. A bacia de estudo é caracterizada por abrigar complexos serranos com topografia imponente e com declives íngremes. Além disso, toda a bacia possui áreas com o relevo ondulado ou forte ondulado. A declividade média é de 17%. O cruzamento dos fatores do meio físico indica mais de 60% da área tem forte ou muito forte potencial natural à erosão laminar. A análise do Potencial Natural à Erosão (PNE) mostrou que o relevo acidentado onde ocorre Cambissolos, Argissolos e Neossolos Litólicos constituem as áreas mais vulneráveis à erosão.

O fator CP é representado pelo Uso e Cobertura do Solo (UCS) e influi no controle ou no aumento do potencial atual à erosão. O grau de detalhamento do mapeamento, elaborado

em escala de 1:50.000, permitiu diferenciar as principais categorias de vegetação e agricultura que possuem comportamentos distintos frente ao processo erosivo. Em áreas cobertas por vegetação arbórea nativa o risco de erosão laminar acelerada é menor, mesmo sob solos e topografia favoráveis ao processo. A silvicultura também oferece relativamente boa cobertura. Porém, as perdas são, em média, maiores do que em solos sob vegetação nativa, principalmente por ter um ciclo rotacional de exploração e envolver operações de preparo do solo. A vegetação campestre e a pastagem possuem valores intermediários de CP. Estudos mais detalhados são necessários para a diferenciação das diversas categorias de pastagem. Com isso, os valores de CP seriam obtidos de acordo com o grau de cobertura que cada uma delas proporciona. Já a cultura permanente oferece cobertura durante todo ano e protege mais o solo do que as lavouras anuais. A agricultura temporária ou anual resulta nas maiores perdas de solo devido à ausência de cobertura em alguns meses do ano. Entre as classes mapeadas, é a que possui os valores maiores de CP. A modelagem utilizando-se a EUPS, considerando o UCS, indica que 46,4% da área de estudo têm um potencial à erosão laminar de média a muito forte, ou seja, com valores acima de  $15 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ . São nessas áreas que o risco de erosão acelerada é maior. As sub-bacias Barra, Barra da Boa Esperança, Contendas, Camapuã, e o vale do Alto Paraopeba, são as unidades de análise que apresentaram as maiores perdas de solo, em média. O vale do Médio Paraopeba e a sub-bacia do ribeirão Águas Claras são as menos suscetíveis à erosão laminar.

Apesar de suas limitações, principalmente quando aplicado em grandes áreas, o método EUPS associado com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem a vantagem de apresentar a vulnerabilidade à erosão laminar espacialmente distribuída, permitindo a realização de um diagnóstico da intensidade e da distribuição da erosão laminar. Além disso, é um modelo bastante estudado e aceito no meio científico, e os dados necessários são geralmente disponíveis em países em desenvolvimento como, por exemplo, no Brasil. Os resultados obtidos podem ser utilizados para o planejamento de uso das terras considerando o risco de degradação dos solos por erosão laminar acelerada, para a definição de áreas prioritárias de conservação, além de servirem como base para a elaboração de futuros estudos.

Além da aplicação da modelagem, foi constatado em campo que a erosão laminar acelerada na área de estudo se desenvolve fundamentalmente a partir da utilização das

terras para atividades agropastoris. Nesse sentido, os sistemas de preparo e manejo do solo são estratégicos, para haver a sustentabilidade entre produção agrícola e a preservação dos recursos do solo e da água. É importante que os agricultores e pecuaristas respeitem a capacidade de uso das terras e adotem sistemas de manejo menos impactantes ao solo.

Em resumo, as principais práticas conservacionistas dividem-se em três categorias: edáficas, vegetativas e mecânicas. As práticas de caráter edáfico envolvem o controle das queimadas, a adubação e a calagem. São utilizadas com o intuito de manter ou melhorar a fertilidade do solo, para manter a superfície com maior cobertura. As práticas de caráter vegetativo são aquelas fundamentadas na utilização da vegetação para o controle da erosão. As principais são: o florestamento/reflorestamento; a manutenção da qualidade da pastagem por meio do manejo da capacidade de suporte da espécie forrageira; a manutenção do solo coberto com restos culturais ou outras “plantas de cobertura”; o cultivo em contorno; o cultivo em faixas; os cordões de vegetação permanente ou barreiras vivas; a ceifa das plantas daninhas ao invés da capina e a rotação de culturas. As práticas de caráter mecânico são, basicamente, a utilização de procedimentos e estruturas artificiais, visando à interceptação ou condução do escoamento superficial. As mais conhecidas são o terraceamento e as barragens de contenção. Diversos autores propõem a adoção de práticas e métodos para evitar a degradação dos solos. Explicações detalhadas sobre os métodos e procedimentos para o controle da erosão em áreas rurais são encontrados em Pruski (2009), Campos (1987) e Tavares (2008).

O desenvolvimento e a difusão dessas medidas são de grande necessidade na alta e média bacia do rio Paraopeba, devido ao alto risco de erosão laminar que possui. Por ser naturalmente frágil ao processo e próxima de um dos maiores centros urbanos do país, a ocupação deve ser feita racionalmente para, dessa forma, evitar a aceleração de processos erosivos, a queda na qualidade do solo e da água e o assoreamento de rios e dos reservatórios de água.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Estudo de Viabilidade de Implementação de Agência de Bacia na Sub-Bacia do Rio Maranhão – MG – Resumo Executivo do Relatório Final. In: *Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco*. Belo Horizonte: ANA/GEF/PNUMA/OEA/IGAM, 2003. 33p.

ALMEIDA, A.N. *Potencial hídrico e quadro geoambiental como suportes ao gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba – MG*. 1999. 173f. (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia e Análise Ambiental, Belo Horizonte, 1999.

AMARAL, A.J.; BERTOL, I.; COGO, N.P.; BARBOSA, F.T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um cambissolo húmico da região do planalto sul-catarinense, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 32, p. 2145-2155, 2008.

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, 2009. P. 74-107.

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.

ANDRIOTTI, J.L.S. *Fundamentos de estatística e geoestatística*. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, 2003. 165 p.

ARAÚJO, E.H.G.; KUX, H.J.H.; ALBUQUERQUE, P.C.G. *Ortorretificação de imagens quickbird orstandard – levantamento de pontos de apoio e métodos de correção geométrica*. São José dos Campos: INPE, 2007. 57p.

ASKOY, H.; KAVVAS, M.L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *Catena*, n.64, p.247-271, 2005.

AYRES, Q.C. *La erosion del suelo y su control*. Barcelona: Omega, 1960. 441 p.

BARBOSA, G.V., RODRIGUES, D.M.S., *Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte: 1967. 130p.

BARRET, E.C.; CURTIS, L.F. *Introduction to environmental remote sensing*. 2<sup>a</sup> ed. London: Chapman and Hall, 1982.

BATALHA, R.M.P. *Expectativa de risco de degradação dos recursos hídricos na bacia do rio Jundiá Mirim*. 2006. 90 f. (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BEM-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G. Soil Reflectance. In: RENCZ, A.N. *Remote sensing for the earth sciences: manual of remote sensing*. 3<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. P. 111-188.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Icone, 1999. 355p.

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

BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. *Visão integrada da problemática da erosão*. Curitiba: Associação de Defesa e Educação Ambiental e Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985. 329p.

BONHAM-CARTER, G.F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Kidlington [Oxfordshire] : Pergamon, 1994. 398 p.

BORGES, K.M.R. *Avaliação da suscetibilidade erosiva da bacia do rio Caririnha (MG/BA) por meio da EUPS – Equação Universal de Perda de Solos*. 2009. 68f. (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BOTELHO, R.G.M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. 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: Bertand, 2009. p. 269-293.

CAMPBELL, J.B. *Introduction to Remote Sensing*. 3ª ed. New York: Guilford Press, 2002. 621p.

CAMPOS, J.O. *Relato da Seção Técnica II*. In: In: Anais do 4º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. São Paulo: ABGE/DAEE, 1987. p. 289-312.

CARDOSO, D.P.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SÁFADI, T.; FONSECA, S.; FERREIRA, M.M.; MARTINS, S.G.; MARQUES, J.J.G.S.M. Erosão hídrica avaliada pela alteração na superfície do solo em sistemas florestais, *Scientia Florestalis*, n. 66, p.25-37, 2004.

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

CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F. Confecção de cartas morfométricas da bacia do São Francisco como subsídio ao estudo de vulnerabilidade ambiental. In: CODEVASF (org.). *Zoneamento ecológico-econômico do vale do São Francisco: estudos dos meios bióticos e abióticos*. Brasília: Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos. p. 201-224, 2003.

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

CARVALHO, L.G.; OLIVEIRA, M.S.; ALVES, M.C.; VIANELLO, R.L.; SEDIYAMA, G.C.; CASTRO-NETO, P; DANTAS, A.A.A. Clima. In: SCOLFORO, J.R.S.; CARVALHO, L.M.T.; DONIZETTE, A. *Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais: componentes geofísico e biótico*. Lavras: Editora UFLA, 2008. 161 p.



CASTRO, O.M. *Manejo e preparo do solo e erosão*. In: I ENCONTRO DO USO DA TERRA DA REGIÃO DO VALE DO PARANAPANEMA, Fundação Cargill, 1985.

CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. *Estudos Integrados de Recursos Naturais: Bacia do Alto São Francisco e Parte Central da Área Mineira da SUDENE*. Belo Horizonte: CETEC, 1983.

CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS. *Diagnóstico ambiental do vale do Paraopeba*. Belo Horizonte: IGA/CETEC, 1996. 245 p.

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. *Aplicação de modelos na previsão de erosão*. In: Anais do 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru: ABGE/DAEE, 1995.

CHEN, D.; STOW, D. Strategies for integrating information from multiple spatial resolutions into land-use/land-cover classification routines, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, n. 11, p. 1279-1287, 2003.

CHORLEY, R.J. The hillslope hydrological cycle. In: KIRKBY, M.J. *Hillslope hydrology*. Chichester: John Wiley & Sons, 1978. p. 1-42

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988. 568p.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2ª ed. São Paulo, Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. *Relato da Seção Técnica I*. In: Anais do 4º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. São Paulo: ABGE/DAEE, 1987. p. 41-49.

COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS, *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais*. Escala 1: 1.000.000. COMIG, 2003.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAOPEBA. Mapa de Uso e Ocupação do Solo. Escala: 1:100.000. CIBAPAR, 2002.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAOPEBA. *Estudos preliminares para o plano diretor das águas do rio Paraopeba*. Betim: CIBAPAR, 2010.

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*. 2005. 166f. (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2005.

COWARDIN, L.M.; CARTER, V.; GOLET, F.C.; LAROE, E.T. *Classification of Wetlands and Deepwater Habitat of the United States*, Fish and Wildlife Service. Washington: U.S. Department of the Interior, 1979.

DANIELS, A.E. Incorporating domain knowledge and spatial relationships into land cover classifications: a rule-base approach, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n. 14, p. 2949-2975, 2006.

DERNADIN, J.E. *Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. 1990. 81 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *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 Soil and Water Conservation*, n.51(5), p.427-433, 1996.

DISSMEYER, G. E.; FOSTER, G. R. Modifying the universal soil loss equation for forest land. In: EL-SWAIFY, S.A.; MOLDENHAUER, W.C.; LO, A. *Soil erosion and conservation*. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985. p.480-495.

DORAN, J.W.; JONES, A.J.; ARSHAD, M.A.; GILLEY, J.E. Determinants of soil quality and health. In: LAL, R. *Soil quality and soil erosion*. Boca Raton: CRC Press, 1999.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. *Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo no conservacionismo do solo*. Eschborn: GTZ, 1991. 272 p.

DRUMMOND, F.N.; BACELLAR, L.A.P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em áreas de rochas gnáissicas do alto rio das Velhas, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, n.2, 2006.

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. 173 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

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, p. 73-85, 2006.

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

FITZGERALD, R.W.; LEES, B.G. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, v. 47, n. 4, p. 362-368, 1994.

FONSECA, L.M.G. *Processamento digital de imagens*. São José dos Campos: INPE, 2000. 105 p.

FONSECA, A.C. Geoquímica dos solos. In: 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: Bertand, 2009. p.165-194.

FOSTER, G.R.; WISCHMEIER, W.H. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction, *Transactions of ASAE*, 17: 305-309.

GILLIESON, D.; LAWSON, T.; SEARLE, L. *Applications of high resolution remote sensing in rainforest ecology and management*. Cairns: Cooperative Research Centre for Tropical Rainforest Ecology and Management, 2006. 54p.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. *Processamento de imagens digitais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004, 609p.

GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*. London: Edward Arnold, 1973. 458 p.

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: Bertand, 2009. p.17-55.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manual técnico da vegetação brasileira*. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de vegetação do Brasil. Escala 1:5.000.000. IBGE, 2004.

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

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manual técnico de pedologia*. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Contribuição do IBRAM para o zoneamento ecológico-econômico e o planejamento ambiental de municípios integrantes da APA SUL RMBH*. Belo Horizonte: IBRAM, 2004.

ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. *Envi User's Guide*: version 4.7. 2009.

JENSEN, J.R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. 526p.

JENSEN, J.R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

JULIEN, P.Y. *Erosion and sedimentation*. New York: Cambridge University Press, 1998. Acesso em 03/11/2009. GoogleBooks.

KIRKBY, M.J. Thresholds and instability in stream head hollows: a model of magnitude and frequency for wash processes. In: KIRKBY, M. J. *Process models and theoretical geomorphology*. Chinchester: John Willey & Sons, 1994. p. 295-314

KOHLER, H.C. Mapa de compartimentação geomorfológica do município de Brumadinho-MG. Escala: 1:50.000. Prefeitura Municipal de Brumadinho, 2008.

LAL, R. Soil erosion and its relation to productivity in tropical soils. In: EL-SWAIFY, S.A.; MOLDENHAUER, W.C.; LO, A. *Soil erosion and conservation*. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985. p.237-247.

LAL R.; ELIOT, W. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. *Soil erosion research methods*. 2. ed. Soil and Water Conservation Society: Ankeny, 1994. 340p.

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

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750p.

LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C.; CHAVES, A.G.M.; SCILEWSKI, L.R. *Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do rio São Francisco*. Brasília: ANEEL/EMBRAPA/ANA, 2001.

LIMA, J.E.F.W. Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para a estimativa da erodibilidade dos solos na bacia experimental do rio Jardim – DF, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 8, n. 2, 2007.

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, p. 233-248, 1992.

MACHADO, R.E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. 2002. 152 f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MANANDHAR, R.; ODEH, I.O.A.; ANCEV, T. Improving the accuracy of land use and land cover classification of landsat data using post-classification enhancement, *Remote Sensing*, n,1, p. 330-344, 2009.

MANNIGEL, A.R.; CARVALHO, M.P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo, *Acta Scientiarum*, v. 24, n. 5. p. 1335–1340, 2002.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; SÁ, M.A.C. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 21, p. 447-456, 1997.

MARQUES, J.J.G.S.; ALVARENGA, R.C.; CURI, N. Erosividade das chuvas da região de Sete Lagoas, MG, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, p.761-768, 1998.

MARQUES, M.R. *Morfodiâmica fluvial cenozóica no vale do rio Paraopeba entre o Fecho do Funil e Juatuba*. 1997. 91 f. (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

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, C.L. *Análise Multitemporal da suscetibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da Equação Universal de Perda de Solos*. 2009. 71 f. (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MATHER, P. *Computer processing of remotely sensed images: an introduction*. Third edition. New York: John Wiley and Sons, 2004.

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.

MCCOY, R.M. *Field methods in remote sensing*. New York: Guilford Press, 2005. 159 p.

MEDINA, A.I.M.; DANTAS, M.E.; SAADI, A. Geomorfologia. In: *Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico*. Belo Horizonte: SEMAD; CPRM, 2005. 45p.

MELLO, C.R. Erosividade mensal e anual da chuva no estado de Minas Gerais, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.4, p.537-545, 2007.

MELLONI, R.; MELLONI, E.G.P.; ALVARENGA, M.I.N. Indicadores da qualidade do solo, *Informe Agropecuário*, v. 29, n. 244, p. 17-29, 2008.

MESQUITA, H.A.; PAULA, M.B.; VENTURIN, R.P. Recuperação de áreas degradadas por cultivos anuais, *Informe Agropecuário*, v. 29, n. 244, p. 45-53, 2008.

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. 112 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2010.

MOREIRA, C.V.R. *Fatores condicionantes das voçorocas na sub-bacia do rio Santo Antônio, bacia do rio Grande*. 1992. 120 f. (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental) – Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 1992.

MORGAN, R.P.C. *Soil erosion and conservation*. 3<sup>a</sup> ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005

NEGREIROS, I.P.M. *Processamento de dados topográficos para o mapeamento de curvatura de vertentes*. 2003. 89f. (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2003.

NETTO, M.M.; SOBREIRA, F.G. Os processos erosivos lineares da bacia hidrográfica do ribeirão carioca, Itabirito/MG e seus condicionantes principais: observações preliminares, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, n.2, 2006

NORTON, D.; SHAINBERG, I.; CIHACECK, L.; EDWARDS, J.H. Erosion and soil chemical properties. In: LAL, R. *Soil quality and soil erosion*. Boca Raton: CRC Press, 1999.

NOVOTNY, V.; OLEM, H. *Water quality: prevention, identification, and management of diffuse pollution*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994. 1054p.

OLIVEIRA, M.C.A.; BOAVENTURA, R.S.; VEADO, R.W.A.; RABELO, R.M.; DONÉ, S.S.B. Projeto de mapeamento das formas de erosão acelerada na Região Metropolitana de Belo Horizonte e cabeceiras do rio das Velhas e do rio Paraopeba. In: III Encontro Nacional de Geógrafos. Fortaleza: AGB, 1978.



OLIVEIRA, G.S.R.; JAQUES, P.D.; SHINZATO, E. Cobertura e Uso da Terra. In: *Projeto APA Sul RMBH: estudos do meio físico*. Belo Horizonte: SEMAD; CPRM, 2005. 45p.

OLIVEIRA, M.A.T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. da; BOTELHO, R.G.M. *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertand, 2009. 339p.

FRAZIER, P.S.; PAGE, K.J. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 66, n.12, 2000.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated World Map of the Koppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, p. 1633-1644, 2007. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/hess-11-1633-2007.pdf>> Acesso em: 24fev.2010.

PINHEIRO, L.B.A.; PONS, N.A.D. Revegetação e estabilidade de taludes, *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.29, n.244, p. 66-74, 2008.

PIRES, L.S.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P.; BRITO, L.F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 4, p.687-695, 2006.

POLITANO, W.; PISSARA, T.C.T. Avaliação por fotointerpretação das áreas de abrangência dos diferentes estados da erosão acelerada do solo em canaviais e pomares de citros, *Engenharia Agrícola*, v. 25, n.1, p.242-252, 2005.

PRUSKI, F.F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F.F. *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. P. 40-73.

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*, 5: 59-79, 1991.

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

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. *Modelos hidrológicos para a gestão ambiental*. São José dos Campos: INPE, 2000.

RICKSON, R.J. The role of simulated vegetation in soil erosion control. In: THORNES, J.B. *Vegetation and erosion: processes and environments*. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. p. 99-111.

RIZZINI, C.T. *Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos*. 2 ed. Rio de Janeiro: Âmbito Cultural Edições, 1997.

RUHOFF, A.L.; SOUZA, B.S.P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R.S. Avaliação dos processos erosivos através da Equação Universal de Perdas de Solos, implementada com algoritmo em LEGAL, *Geomática*, v. 1, n. 1, p. 12-22, 2006.

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: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3039-3046.

SALGADO, A.A.R.; VARAJÃO, C.A.C.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, A. F.D.C.; NALINI JÚNIOR, H.A.; CHEREM, L.F.S.; MARENT, B.R.; BRINDUSA, C.B. Estimativa das taxas de erosão das terras altas da alta bacia do rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero: implicações para a evolução do relevo, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 8, n.2, p 3-10, 2007.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. 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: Bertand, 2009. 339p.

SANTOS, D. *Elementos de fotogrametria e sensoriamento remoto*. Curitiba: UFPR, 2010. 143p.

SANTOS, G.M. Brasil dispõe da tecnologia mais avançada para o eucalipto, *Informe Agropecuário*, v. 30, p.57-66, 2009.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A.A. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: perdas de solo e água, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 24, 427-436, 2000.

SCHOWENGERDT, R.A. *Remote sensing: models and methods for image processing*. 3<sup>rd</sup>. ed. Burlington: Elsevier, 2007. 509 p.

SCHVARTZMAN, A.S. *Outorga e cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba em Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2000. 140p.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LIMA, J.M.; FERREIRA, M.M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 6, p.1207-1220, 2000.

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

SILVA, V.C. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS, na bacia do rio Paracatu, *Pesquisa Agropecuária Tropical*, n.33(1), p.29-34, 2003b.

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

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

SILVA, A.M. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura*, vol. 8, 2008. p. 5-13.

SILVA, A.M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 33, p. 1811-1820, 2009a.

SILVA, R.M.; PAIVA, F.M.L.; SANTOS, C.A.G. Análise do grau de erodibilidade e perdas de solo na bacia do rio Capiá baseado em SIG e sensoriamento remoto, *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n.1, p. 26-40, 2009b.

SILVA, E.A.; QUEIROZ, D.S., GUIMARÃES, A.S.; RUAS, J.R.M.; CARVALHO, B.C.; MENEZES, A. C. Potencial das pastagens tropicais para a produção de leite, *Informe Agropecuário*, v. 31, n. 258, p. 18-28, 2010.

SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. *Watershed models*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 653p.

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: *Anais do 4º Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. São Paulo: ABGE/DAEE, 1987. p. 105 -136

STEIN, D.P. Diagnostico de erosão. In: *Anais do 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão*. Bauru: ABGE/DAEE, 1995.

STOCKING, M. A. Assessing vegetative cover and management effects. In: LAL, R. *Soil erosion research methods 2*. Ed. Soil and Water Conservation Society: Ankeny, 1994. P. 211-234.

SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Bluncher, 2003. 400 p.

TARBOTON, D.G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, *Hydrological Processes*, n. 5, p. 81-100, 1991.

TARBOTON, D.G. A new method for determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, vol. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.

TAVARES, S.R.L. *Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 228 p.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B; MELFI, A.J. Intemperismo e formação do solo. In: Teixeira *et al.* (org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

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, p. 235-244, 2005.

TÔSTO, S.G.; CAMPOS, E.M.G.; NEVES, C. Estudo de avaliação econômica na recuperação de voçoroca em Lagoa Dourada. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2000. 27 p.

TSO, B.; MATHER, P.M. *Classification methods for remotely sensed data*. New York: Taylor and Francis, 2001. 376 p.

TOUTIN, T. Geometric process of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004.

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

VAL, L.A. *Avaliação dos índices de erosividade das chuvas no Município de Lavras, MG*. 1985. 72p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

VALERIANO, M.M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (org.). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

VALERIANO, M.M.; ROSSETI, D.F. *Topodata: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM*. São José dos Campos: INPE, 2008.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: FERREIRA, M. E. E.; CRUZ, M. C. P. *Solos Altamente Suscetíveis à Erosão*. Jaboticabal: FCAVUNESP/ Soc. Bras. de Ciênc. do Solo, 1994, p. 223-242.

VARAJÃO, C.A.C.; SALGADO, A.A.R.S.; VARAJÃO, A.F.D.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JUNIOR, H. A. Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (<sup>10</sup>Be) e da pedogênese, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 33, p. 1409 – 1425, 2009.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (DERNA), 1991. 124 p.

VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. *Environmental Hydrology*. 2 ed. Boca Raton, 2003. 475 p.

WINCHELL, M.F.; JACKSON, S.H.; WADLEY, A.M.; SRINIVASAN, R. Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds, *Journal of Soil and Water Conservation*, n. 63, p. 105-111, 2008.

WISCHMEIER, W.H. *Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas*. ARS-S-40. Washington: Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, 1975. p. 118-124.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington: Agriculture Research Service, United States Department of Agriculture, 1978. 58p. (Agriculture handbook, 537)

WOLF, P.R.; DEWITT, B.A. *Elements of photogrammetry: with applications in GIS*. 3<sup>a</sup> ed. Boston: McGrawHill, 2000. 624p.