

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À EROSÃO DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO DAS PEROBAS POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

JULIO CESAR DEMARCHI¹
RODRIGO JOSÉ PISANI²
CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK³

ANALYSIS OF VULNERABILITY TO EROSION IN RIBEIRÃO DAS PEROBAS SUB-BASIN BY MEANS OF REMOTE SENSING AND GEOPROCESSING

RESUMO

A vulnerabilidade dos solos à erosão, de acordo com a abordagem ecodinâmica, resulta do balanço entre os processos morfogenéticos e pedogenéticos que promovem a formação do solo ou sua perda por erosão, originando unidades de paisagens estáveis, intermediárias ou fortemente instáveis. Neste contexto, este trabalho objetivou estudar a vulnerabilidade natural à erosão da sub-bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP, a partir da metodologia de Crepani et al. (2001) segundo os princípios da Ecodinâmica de Tricart, por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto e ferramentas de Geoprocessamento, representando a dimensão ambiental do Zoneamento Ecológico-Econômico. A partir da média aritmética entre os mapas dos fatores Geologia, Relevo, Solos, Vegetação/uso da terra e Clima, foram obtidos os mapas de vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem. Os meios moderadamente estáveis (índice de vulnerabilidade 1,5 a 1,7) representam 10,35 % da área da sub-bacia; os meios medianamente estáveis/vulneráveis (índice de vulnerabilidade 1,8 a 2,2) ocupam 85,04 % e os meios moderadamente vulneráveis (índice de vulnerabilidade 2,3 a 2,5) ocupam 4,61 % de sua área total, denotando o predomínio do equilíbrio entre os processos morfogenéticos e pedogenéticos e a vulnerabilidade média dos solos aos processos erosivos.

Palavras-chave: relação morfogênese/pedogênese; ecodinâmica; geotecnologias; unidades de paisagem; Zoneamento Ecológico-Econômico.

ABSTRACT

According to the ecodynamics approach, the vulnerability of soils to erosion results from the balance between morphogenetic and pedogenic processes, which promote either soil formation or its loss by erosion, generating stable, intermediate or highly unstable landscapes unities. In this context, this paper aimed to study the natural vulnerability to erosion of the Ribeirão das Perobas sub-basin, located in the city of Santa Cruz do Rio Pardo, São Paulo State, using the methodology of Crepani et al.

¹ Geógrafo. Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA/Unesp – Câmpus de Botucatu – julio.demarchi@gmail.com.

² Geógrafo. Doutorando em Geociências e Meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE/Unesp – Câmpus de Rio Claro – pisanigeo@gmail.com.

³ Professora Adjunta do Departamento de Solos e Recursos Ambientais. Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA/Unesp – Câmpus de Botucatu – czimback@gmail.com.

(2001), according to the principles of Tricart's ecodynamics, by means of Remote Sensing techniques and GIS tools, representing the environmental dimension of the Ecological-Economic Zoning. From the arithmetic average among maps of the factors Geology, Relief, Soils, Vegetation/land use and Climate, the environmental vulnerability maps of landscape unities were obtained. Moderately stable means (vulnerability index 1.5 to 1.7) represent 10.35% of the sub-basin area; moderately stable/vulnerable means (vulnerability index 1.8 to 2.2) occupy 85.04% and moderately vulnerable means (vulnerability index 2.3 to 2.5) occupy 4.61% of its total area, indicating the predominance of the balance between morphogenetic and pedogenic processes and the medium vulnerability of its soil to erosion.

Keywords: morphogenesis/pedogenesis relationship; ecodynamics; geotechnology; landscape unities; Ecological-Economic Zoning.

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo consiste no processo de desprendimento e arraste das partículas provocado pela ação da água e do vento, constituindo a principal causa da degradação das terras agrícolas (PRUSKI, 2009). De acordo com Guerra (2005), o processo erosivo ocorre em três fases: a remoção de partículas, o transporte desse material, realizado pelos agentes erosivos e a deposição do material transportado, quando não há energia suficiente para a continuidade do transporte.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2005), a erosão é provocada por forças ativas como as características da chuva, a declividade e comprimento do declive do terreno e a capacidade do solo de absorver água, e por forças passivas, como a resistência do solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal. Segundo Weill e Pires Neto (2007), os principais fatores condicionantes da aceleração do processo erosivo em áreas agrícolas, provocados pelo homem, incluem a retirada da vegetação natural para a implantação dos agrossistemas e demais usos, o manejo incorreto dos solos produtivos, a exploração inadequada de terras marginais, a pressão de ocupação da terra por usos competitivos, o uso intensivo das terras com potencial natural de erosão elevado e, sobretudo, a falta de planejamento da ocupação. De acordo com Castro (1991), a perda de solo por erosão no estado de São Paulo é de aproximadamente 200 milhões de toneladas por ano. Este dado demonstra a necessidade de pesquisas visando à avaliação da suscetibilidade natural dos solos à erosão e à quantificação das perdas de solo, sobretudo dos solos agrícolas ou dos meios fortemente antropizados.

Com o objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal, Crepani et al. (1996) desenvolveram uma metodologia visando à análise e ao mapeamento da vulnerabilidade natural das paisagens à erosão. Essa metodologia foi aperfeiçoada por Crepani et al. (2001) e está embasada na caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem resultantes da relação entre os processos de morfogênese e pedogênese segundo os princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977), que estabelece três categorias morfodinâmicas:

- Meios estáveis: caracterizados pela cobertura vegetal densa, dissecação moderada e ausência de manifestações vulcânicas, com favorecimento à pedogênese;

- Meios intergrades: caracterizados pelo balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas e pela transição entre os meios estáveis e instáveis;

- Meios fortemente instáveis: condições bioclimáticas agressivas com variações fortes e irregulares de ventos e chuvas, relevo com vigorosa dissecação, presença de solos rasos, baixa densidade de cobertura vegetal, planícies e fundos de vale sujeitos a inundações e geodinâmica interna intensa.

Para se analisar uma unidade de paisagem natural representativa do grau de estabilidade ou vulnerabilidade dos solos à erosão, é necessário conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, características climáticas regionais, assim como o tipo de cobertura vegetal que sobre ela se desenvolve. Tais informações são fornecidas pela geologia, geomorfologia, pedologia, fitogeografia e climatologia, e sua integração fornece um retrato fiel do comportamento de cada unidade frente à sua ocupação (CREPANI et al., 1996). As unidades de paisagem resultantes desta integração de fatores naturais que apresentam maior estabilidade e predomínio da pedogênese são representadas por valores de vulnerabilidade próximos de 1,0; as unidades de estabilidade intermediária são representadas por valores próximos de 2,0, e as unidades territoriais básicas mais vulneráveis, com predomínio dos processos de morfogênese, apresentam valores próximos de 3,0 (CREPANI et al., 2008).

O Zoneamento Ecológico-Econômico integra as dimensões ambiental e produtiva e constitui um instrumento básico para o desenvolvimento sustentável. Para tanto, a definição das zonas ecológico-econômicas deve resultar de uma

metodologia integradora, de atualização permanente e em tempo real, que só é possível a partir do desenvolvimento de técnicas de coleta, tratamento e análise de informações, entre as quais se destacam os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que permitem o estabelecimento de relações espaciais entre informações temáticas georreferenciadas, como os planos de informação correspondentes aos fatores da vulnerabilidade natural à erosão (BECKER; EGLER, 1996).

Diversos pesquisadores aplicaram a metodologia de Crepani et al. (1996) na determinação da vulnerabilidade natural à erosão em diferentes recortes espaciais. Ribeiro e Campos (2007) avaliaram a vulnerabilidade à erosão dos solos da região do Alto Pardo, nos municípios de Pardinho e Botucatu – SP, realizando o mapeamento do fator uso da terra a partir de segmentação e classificação Ioseg de imagens do satélite Landsat 7 ETM+ no SIG Spring e a adaptação dos índices de vulnerabilidade à erosão à vegetação típica da região. A vulnerabilidade do fator relevo foi determinada pelo mapa de declividade, e a vulnerabilidade para o fator clima foi obtida da divisão do índice pluviométrico médio anual por doze meses. A área estudada apresentou grau de vulnerabilidade entre 1,1 e 2,2, ou seja, entre as classes estável e medianamente estável/vulnerável.

Lage et al. (2008) estudaram o potencial ecodinâmico da paisagem da Bacia do Rio Corrente, afluente do Rio São Francisco localizado no Sudoeste da Bahia, através do cruzamento dos mapas dos fatores em ambiente SIG. Os fatores utilizados foram: litologia, relevo, solos, vegetação e uso do solo, sendo que os dois últimos fatores expressam a densidade de cobertura vegetal e as formas de derivações antropogênicas existentes, respectivamente. O fator clima não foi utilizado na análise, e o mapa de potencial ecodinâmico resultante foi dividido em doze Unidades Integradas da Paisagem (UIP), que apresentaram, em sua maioria, padrões ecodinâmicos instáveis a muito instáveis.

Batista e Veríssimo (2012) elaboraram o mapa de vulnerabilidade ambiental da Região Metropolitana de Fortaleza a partir da metodologia de Crepani et al. (2001), e compararam-na ao mapa de vulnerabilidade ambiental das unidades geossistêmicas elaborado por Brandão (1995) a partir da classificação ecodinâmica de Tricart (1977). Embora alguns pesos dos fatores tenham sido modificados pelos autores em relação à metodologia original, os resultados obtidos foram mais fiéis à realidade ambiental local que o modelo de vulnerabilidade ecodinâmica, sobretudo

nas áreas correspondentes aos geossistemas planícies fluviais e tabuleiros pré-litorâneos, de vulnerabilidade ambiental alta a muito alta, anteriormente classificadas como vulnerabilidade baixa ou muito baixa.

O objetivo deste trabalho foi analisar a vulnerabilidade natural à perda de solo por erosão das unidades de paisagem da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo, como subsídio ao zoneamento ecológico-econômico da sub-bacia, a partir da metodologia desenvolvida por Crepani et al. (2001), com o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e ferramentas de Geoprocessamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

2.1.1 Caracterização da área de estudo

A Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas está localizada na porção Oeste do município de Santa Cruz do Rio Pardo, o qual se encontra na região Centro-Oeste do Estado de São Paulo. É limitada pelas coordenadas geográficas: latitude 22°47'15.04"S a 22°50'44.29"S; longitude 49°38'55.13"W a 49°43'46.42"W, e sua área é de aproximadamente 30,611 km² (Figura 1).



Figura 1. Localização da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.

De acordo com o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2008), a área de estudo está localizada sobre a Província Paraná, em duas formações geológicas do Período Cretáceo, Era Mesozóica: a Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, composta de basaltos e andesitos basálticos toleíticos, riolitos e riolacitos com intercalações de camadas de arenitos, litarenitos e arenitos vulcânicos, situada nos vales do Ribeirão das Perobas e do Rio Turvo, do qual a sub-bacia em análise é afluyente; e a Formação Vale do Rio Peixe, do Grupo Bauru, composta de arenitos muito finos a finos marrons, rosas e alaranjados bem selecionados, camadas tabulares de siltito maciço de cor creme a marrom e lentes de arenito conglomerático com intraclastos argilosos ou carbonáticos. Esta formação geológica corresponde à Formação Adamantina, do Grupo Bauru, de acordo com IPT (1981), e assenta-se sob os divisores de águas da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.

Em relação ao relevo, de acordo com Ross e Moroz (1997), a Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas está localizada na Unidade Morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, na Unidade Morfoescultural Planalto Ocidental Paulista e na unidade geomorfológica Planalto Centro Ocidental, caracterizada por formas de relevo denudacionais cujo modelado constitui-se basicamente de colinas amplas e baixas com topos convexos ou de topos aplanados ou tabulares, com altimetria entre 400 e 700 metros e declividade média predominante nas vertentes entre 2 e 10 %.

As normais climáticas do município de Santa Cruz do Rio Pardo apresentadas por Miranda et al. (2005) permitem classificar seu clima no tipo Am, tropical chuvoso com inverno seco, com índice pluviométrico do mês mais seco inferior a 60 mm e temperatura média dos meses mais frio e mais quente, respectivamente, igual ou superior a 18°C e maior ou igual a 22°C, conforme os critérios da classificação climática de Köppen-Geiger propostos por Peel et al. (2007). Seu índice pluviométrico médio anual é de 1.475,3 mm, sendo a estação chuvosa de outubro a março e a estação seca de abril a setembro.

De acordo com o Mapa de Vegetação do Brasil (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2004), a cobertura vegetal predominante na sub-bacia é a Floresta estacional semidecidual (Floresta tropical subcaducifólia), subtipo Vegetação secundária e atividades agrárias.

2.1.2 Materiais cartográficos, sistemas computacionais e dados utilizados

Foram utilizados os materiais cartográficos, dados e sistemas computacionais abaixo relacionados para o desenvolvimento deste trabalho:

- Sistema de Informações Geográficas ArcGIS / ArcMap 9.3.1 (ESRI, 2009), utilizado na elaboração do banco de dados geográficos (gdb), produção dos mapas temáticos e cruzamento dos mesmos para a geração do mapa de vulnerabilidade natural à erosão;

- Mapa Geológico do Estado de São Paulo na escala 1:750.000, elaborado por CPRM (2006);

- Carta topográfica do IBGE (1973), folha Santa Cruz do Rio Pardo (SF-22-Z-A-VI-4), na escala 1:50.000, com equidistância das curvas de nível de 20 metros, utilizada na elaboração da base cartográfica, extração do modelo digital de elevação do terreno, do mapa de declividade e da rede de drenagem da área de estudo;

- Mapa detalhado de solos da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, elaborado por Demarchi (2012);

- Imagens de satélite, utilizadas no mapeamento de uso da terra: a) ALOS, sensores AVNIR-2 (bandas 1, 2 e 3 – resolução espacial 10 metros) e PRISM (banda pancromática – resolução espacial 2,5 metros) de 11/03/2007; b) Landsat-5,

sensor TM, órbita/ponto 221/076, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 de resolução espacial 30 metros, passagem de 29/01/2011; c) IRS-P6 (Resource-Sat 1), sensor LISS-III, órbita/ponto 328/094, bandas 2, 3, 4 e 5 de resolução espacial 23,5 metros, passagens de 07/12/2010 e 24/01/2011;

- Dados das estações pluviométricas São Pedro do Turvo (latitude 22°45'00.000"S, longitude 49°43'59.88"W e altitude 460 metros) e Santa Cruz do Rio Pardo (latitude 22°54'00.000"S, longitude 49°37'00.12"W e altitude 490 metros) obtidos no Portal Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos da Agência Nacional das Águas.

2.2 Procedimentos metodológicos

O mapa de vulnerabilidade natural à perda de solo da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas foi gerado a partir da álgebra dos mapas temáticos dos componentes da paisagem (Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação/uso da terra e Clima), em ambiente de Sistema de Informação Geográfica, conforme Equação 1, desenvolvida por Crepani et al. (2001). A cada classe temática dos mapas temáticos que compõem a unidade de paisagem, foi associado um valor que indica seu grau de vulnerabilidade à perda de solo, que varia de 1 a 3.

$$V = \frac{G+R+S+Vg+C}{5} \quad (1)$$

Onde: V representa a vulnerabilidade natural da unidade de paisagem à erosão, G representa a vulnerabilidade para o tema Geologia, R representa a vulnerabilidade para o tema Geomorfologia, S é a vulnerabilidade para o tema Solos, Vg é a vulnerabilidade para o tema Vegetação/uso da terra e C a vulnerabilidade para o fator Clima.

A metodologia utilizada no mapeamento dos componentes naturais das unidades de paisagem e para atribuição do grau de vulnerabilidade natural à erosão é apresentada a seguir.

2.2.1 Vulnerabilidade do fator Geologia (G)

A contribuição da Geologia para a análise da morfodinâmica das unidades de paisagem natural compreende as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem e à história de evolução do ambiente geológico. No entanto, a Ecodinâmica adota o grau de coesão das rochas como informação básica do fator Geologia, uma vez que em rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto sobre as rochas bastante coesas prevalecem os processos de formação dos solos (CREPANI et al., 1996).

O mapa de vulnerabilidade natural à erosão do fator Geologia foi obtido a partir do recorte do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006) no SIG ArcMap 9.3.1, tendo como máscara o limite da sub-bacia do Ribeirão das Perobas.

Aos principais tipos de rochas das duas formações geológicas presentes na área de estudo (basalto da Formação Serra Geral e arenito da Formação Vale do Rio Peixe), foram associados os índices de vulnerabilidade da Tabela 1, propostos por Crepani et al. (2001) em função do seu grau de coesão. O arquivo vetorial foi convertido para o formato matricial, usando como indicadores os valores de vulnerabilidade da sua tabela de atributos.

Tabela 1. Escala de vulnerabilidade à erosão das rochas mais comuns

Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Milonito, quartzo muscovita, biotita, clorita xisto	1,7	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Riólito, granito, dacito	1,1	Piroxenito, anfíbolito kimberlito, dunito	1,8	Conglomerados, subgrauvacas	2,5
Granodiorito, quartzo diorito, granulito	1,2	Hornblenda, tremolita, actinolita xisto	1,9	Grauvacas, arcózios	2,6
Migmatitos, gnaisses	1,3	Estaurolita xisto, xistos granatíferos	2,0	Siltitos, argilitos	2,7
Fonólito, nefelina sienito, traquito, sienito	1,4	Filito, metassiltito	2,1	Folhelhos	2,8
Andesito, diorito, basalto	1,5	Ardósia, metargilito	2,2	Calcários, dolomitos, margas, evaporitos	2,9
Anortosito, gabro, peridotito	1,6	Mármore	2,3	Sedimentos inconsolidados: aluviões, colúvios etc.	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

2.2.2 Vulnerabilidade do fator Geomorfologia (R)

O mapa de vulnerabilidade à erosão para o fator Geomorfologia foi obtido a partir da média aritmética de três índices morfométricos do terreno: amplitude altimétrica, densidade de drenagem e declividade. O mapa de densidade de drenagem substituiu o mapa de amplitude interfluvial, subfator proposto por Crepani et al. (2001), devido à dificuldade de se determinar tal índice, que é espacialmente variável mesmo entre dois cursos d'água adjacentes e implicaria na necessidade da adoção de valores médios. O uso do índice morfométrico densidade de drenagem foi proposto por Arnesen et al. (2009).

Para a elaboração do mapa de amplitude altimétrica da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, realizou-se a compartimentação da mesma em sub-bacias a partir da vetorização dos divisores de águas, realizada sobre as curvas de nível, o modelo digital de elevação do terreno e o mapa de direção do fluxo. As altitudes máxima e mínima, bem como a amplitude altimétrica, foram determinadas pela análise zonal no SIG utilizado para este trabalho, que calcula os parâmetros estatísticos do modelo digital de elevação do terreno de cada polígono correspondente às sub-bacias da área de estudo.

Os valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica, que está relacionada ao aprofundamento da dissecação do relevo e indica a energia potencial disponível para o escoamento superficial (*runoff*) e a erosão do solo (Crepani et al., 2008), são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica

Amplitude altimétrica (m)	Vuln.	Amplitude altimétrica (m)	Vuln.	Amplitude altimétrica (m)	Vuln.
< 20	1,0	77 - 84,5	1,7	141,5 - 151	2,4
20 - 29,5	1,1	84,5 - 94	1,8	151 - 160,5	2,5
29,5 - 39	1,2	94 - 103,5	1,9	160,5 - 170	2,6
39 - 48,5	1,3	103,5 - 113	2,0	170 - 179,5	2,7
48,5 - 58,0	1,4	113 - 122,5	2,1	179,5 - 189	2,8
58 - 67,5	1,5	122,5 - 132	2,2	189 - 200	2,9
67,5 - 77	1,6	132 - 141,5	2,3	> 200	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

A densidade de drenagem, índice que mede a intensidade de dissecação do relevo pela drenagem, está diretamente relacionada à porosidade e permeabilidade do solo e da rocha (CREPANI et al., 2008), e conseqüentemente, ao volume do escoamento superficial responsável pelo processo erosivo. Este índice foi determinado através da equação

$$Dd = L / A \quad (2)$$

Onde: Dd é a densidade de drenagem (km/km²), L é o comprimento total da rede de drenagem (km) e A é a área da bacia hidrográfica (km²).

A classificação da densidade de drenagem em valores de vulnerabilidade à erosão foi realizada com base nos limites das classes qualitativas propostas por Florenzano (2008), expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de vulnerabilidade para a densidade de drenagem

Densidade de drenagem	Vulnerabilidade	Classe	Densidade de drenagem	Vulnerabilidade	Classe
<0,5	1	Muito baixa	5,25 - 6,0	2,1	Média
0,5 - 0,86	1,1	Baixa	6,0 - 6,75	2,2	
0,86 - 1,22	1,2		6,75 - 7,5	2,3	
1,22 - 1,58	1,3		7,5 - 9,6	2,4	
1,58 - 1,94	1,4		9,6 - 11,7	2,5	
1,94 - 2,3	1,5		11,7 - 13,8	2,6	Alta
2,3 - 2,66	1,6	13,8 - 15,9	2,7		
2,66 - 3,0	1,7	15,9 - 18,0	2,8		
3,0 - 3,75	1,8	Média	18,0 - 20,0	2,9	
3,75 - 4,5	1,9		> 20	3,0	Muito alta
4,5 - 5,25	2,0				

Adaptado de: Florenzano (2008).

A declividade do terreno, que indica sua inclinação em relação ao horizonte, guarda relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade do escoamento superficial. Desta forma, quanto maior for a declividade, maiores serão a velocidade do *runoff* e a sua capacidade de transporte de sedimentos (CREPANI et al., 2001). A Tabela 4 apresenta os valores de vulnerabilidade à erosão para a declividade do terreno

propostos pelos autores supracitados.

Tabela 4. Valores de vulnerabilidade para a declividade do terreno

Declividade (%)	Vuln.	Declividade (%)	Vuln.	Declividade (%)	Vuln.
< 3,5	1,0	17,4 - 19,8	1,7	34,6 - 37,2	2,4
3,5 - 5,8	1,1	19,8 - 22,2	1,8	37,2 - 39,8	2,5
5,8 - 8,2	1,2	22,2 - 24,5	1,9	39,8 - 42,4	2,6
8,2 - 10,3	1,3	24,5 - 27,2	2,0	42,4 - 45,3	2,7
10,3 - 12,9	1,4	27,2 - 29,6	2,1	45,3 - 48,1	2,8
12,9 - 15,1	1,5	29,6 - 32,1	2,2	48,1 - 50	2,9
15,1 - 17,4	1,6	32,1 - 34,6	2,3	> 50	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

O mapa de declividade, obtido no SIG ArcMap 9.3.1 a partir do modelo digital de elevação do terreno, foi reclassificado nos intervalos apresentados na Tabela 4 e convertido no formato raster, utilizando como indicadores os valores de vulnerabilidade para a declividade.

2.2.3 Vulnerabilidade do fator Solos (S)

Embora a erodibilidade dos solos esteja relacionada à sua composição granulométrica e mineralógica e aos seus atributos físicos e químicos, a análise da vulnerabilidade dos solos à erosão considera o seu grau de maturidade, produto direto do balanço morfogênese/pedogênese, e indica a prevalência dos processos erosivos da morfogênese que geram solos jovens e pouco desenvolvidos ou das condições de estabilidade e do processo de pedogênese, que resulta em solos maduros, profundos, lixiviados e bem desenvolvidos (CREPANI et al., 2008).

Para analisar a vulnerabilidade à erosão dos solos da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, utilizou-se o levantamento detalhado de solos realizado por Demarchi (2012) a partir da técnica da fotopedologia e da quantificação dos atributos químicos, físicos e morfológicos dos perfis de solos em tradagens e trincheiras. A Tabela 5 apresenta os valores de vulnerabilidade do fator solos à erosão, propostos por Crepani et al. (2001) e adaptados para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos atual (EMBRAPA, 2006).

Tabela 5. Valores de vulnerabilidade dos solos

Classes de solos (EMBRAPA, 2006)	Vuln.
Latossolos	1,0
Argissolos, Luvisolos, Nitossolos, Chernossolos, Planossolos e Espodossolos	2,0
Cambissolos	2,5
Neossolos, Vertissolos, Organossolos, Gleissolos, Plintossolos e Afloramentos rochosos	3,0

Adaptado de: Crepani et al. (2008).

2.2.4 Vulnerabilidade do fator Vegetação/uso da terra

A cobertura vegetal do terreno tem a função de retardar o ingresso das águas provenientes das chuvas nas correntes de drenagem pelo aumento da capacidade de infiltração. Nesse contexto, sua participação na caracterização das unidades de paisagem está diretamente relacionada à capacidade de proteção do solo, e o parâmetro a ser considerado na análise da vulnerabilidade à erosão é a densidade de cobertura vegetal (CREPANI et al., 2008). Os processos morfogenéticos relacionam-se às coberturas vegetais de densidade mais baixa, enquanto os processos pedogenéticos ocorrem em situações em que a cobertura vegetal mais densa permite o desenvolvimento e a maturação do solo.

Como a metodologia de Crepani et al. (2001) foi inicialmente concebida para o Zoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia, os valores de vulnerabilidade para a Vegetação/uso da terra definidos pelos autores foram dirigidos a este bioma e a outras formações vegetais naturais. Considerando que a sub-bacia do Ribeirão das Perobas está ocupada por diferentes atividades agropecuárias e que possui poucos remanescentes da vegetação natural, foram adotados os índices de vulnerabilidade propostos por Ribeiro e Campos (2007) para a região do Alto Rio Pardo em Botucatu e Pardinho – SP, e por Arnesen et al. (2009) para o município de Santo Amaro da Imperatriz – SC. Para as classes “cultura semiperene” e “cultura anual”, adotaram-se valores intermediários de vulnerabilidade entre as classes “cultura anual” e “solo exposto” em razão das características dos ciclos das culturas e da densidade de cobertura e frequência de proteção ao solo contra os processos erosivos. Estes índices de vulnerabilidade encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de vulnerabilidade para a Vegetação/uso da terra

Cobertura do solo	Vulnerabilidade
Açude ¹	1,5
Área construída ¹	3,0
Cultura anual	2,8
Cultura perene ¹	2,5
Cultura semiperene	2,7
Mata nativa e ciliar ¹	1,0
Pastagem ¹	2,0
Reflorestamento (eucalipto) ²	2,0
Solo exposto	3,0

Fonte: ¹Ribeiro e Campos (2007); ²Arnesen et al. (2009).

O mapa de uso da terra da área de estudo foi elaborado no SIG ArcMap 9.3.1 a partir da análise visual e vetorização das classes temáticas sobre a imagem do satélite ALOS, fusão PRISM/AVNIR-2, de 11/03/2007, com resolução espacial reamostrada para 2 metros. Os usos da terra foram atualizados para o mês de janeiro de 2011, mês de maior índice pluviométrico e erosividade da chuva na área de estudo, a partir da análise das composições coloridas 743, 543, 453 e 321 das imagens Landsat e das composições coloridas 543 e 453 das imagens IRS-P6 referidas no item 2.1.2.

2.2.5 Vulnerabilidade do fator Clima (C)

O principal elemento climático a ser considerado na análise da vulnerabilidade à erosão dos solos tropicais é a precipitação pluvial, e as principais características das chuvas relacionadas ao processo erosivo são: quantidade ou pluviosidade total, intensidade pluviométrica e distribuição sazonal (BUCKMAN; BRADY, 1976). A característica mais importante é a intensidade pluviométrica, pois representa uma relação entre as outras duas características (quanto chove / quando chove), ou seja, uma pluviosidade anual elevada, mas distribuída ao longo de todo o período, tem poder erosivo menor que uma precipitação anual mais reduzida, mas concentrada num determinado período do ano, situação responsável pela forte denudação das regiões semi-áridas (CREPANI et al., 2004).

A vulnerabilidade para o fator clima da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas foi

determinada através da intensidade pluviométrica, calculada pela Equação 3, proposta por Palmeira (2004).

$$\text{Intensidade pluviométrica} = \frac{\text{Precipitação média anual}}{\text{Número de dias com chuva} / 30} \quad (3)$$

A divisão do número de dias com chuva por 30 é necessária para transformá-lo em meses e apresentar os resultados em mm/mês.

Para a obtenção da precipitação média anual e do número de dias com chuva, utilizaram-se os dados do posto pluviométrico “São Pedro do Turvo”, posto mais próximo da área de estudo. Os dados faltantes foram preenchidos com os dados coletados do posto pluviométrico “Santa Cruz do Rio Pardo”. Foi utilizada uma série temporal de trinta anos, de janeiro de 1981 a dezembro de 2011, excluído o ano 2010 por ter apresentado falha de dados em ambos os postos pluviométricos. A precipitação média anual corresponde à precipitação média dos 30 anos, e o número de dias com chuva corresponde à média do número de dias por ano que apresentaram índices pluviométricos diferentes de zero nestes trinta anos. A intensidade pluviométrica também foi obtida individualmente para todos os anos, a partir do índice pluviométrico anual e do número de dias chuvosos, seguida do cálculo da média da intensidade pluviométrica dos 30 anos.

A intensidade pluviométrica obtida para a área de estudo foi classificada na escala de vulnerabilidade à perda de solo elaborada por Crepani et al. (2001) e expressa na Tabela 7.

Tabela 7. Valores de vulnerabilidade à perda de solo para a intensidade pluviométrica

Intensidade pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
< 50	1,0	200 - 225	1,7	375 - 400	2,4
50 - 75	1,1	225 - 250	1,8	400 - 425	2,5
75 - 100	1,2	250 - 275	1,9	425 - 450	2,6
100 - 125	1,3	275 - 300	2,0	450 - 475	2,7
125 - 150	1,4	300 - 325	2,1	475 - 500	2,8
150 - 175	1,5	325 - 350	2,2	500 - 525	2,9
175 - 200	1,6	350 - 375	2,3	> 525	3,0

Fonte: Crepani et al. (2001).

2.2.6 Vulnerabilidade natural das unidades de paisagem à perda de solo

A vulnerabilidade natural das unidades de paisagem da sub-bacia do Ribeirão das Perobas à erosão foi obtida no SIG ArcMap 9.3.1 através da média aritmética dos mapas dos fatores da Equação 1. O método utilizado para estudos ambientais em ambiente SIG foi o das localizações pontuais, em que cada pixel da área de estudo é examinado e processado individualmente, sem relação com os demais. Porém, como os mapas de fatores são do tipo zonal, espera-se que o produto (mapa de vulnerabilidade natural à erosão) apresente relativa homogeneidade espacial, característica fundamental para o planejamento do uso e ocupação do solo a partir do Zoneamento Ecológico-Econômico.

Os resultados obtidos foram apresentados em mapas quantitativos (média de vulnerabilidade) e qualitativos (grau de vulnerabilidade das unidades de paisagem à erosão), classificados de acordo com a Tabela 8, elaborada por Crepani et al. (2001). Em ambos os mapas, foi calculada a área das classes temáticas de vulnerabilidade à erosão por meio de suas tabelas de atributos, as quais subsidiaram a interpretação e discussão dos resultados.

Tabela 8. Escala de vulnerabilidade das unidades de paisagem à perda de solo

Unidade de paisagem	Média	Grau de vulnerabilidade
U1	3,0	Vulnerável
U2	2,9	
U3	2,8	
U4	2,7	
U5	2,6	Moderadamente vulnerável
U6	2,5	
U7	2,4	
U8	2,3	
U9	2,2	Medianamente estável / vulnerável
U10	2,1	
U11	2,0	
U12	1,9	
U13	1,8	Moderadamente estável
U14	1,7	
U15	1,6	
U16	1,5	
U17	1,4	Estável
U18	1,3	
U19	1,2	
U20	1,1	
U21	1,0	

Fonte: Crepani et al. (2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A constituição geológica da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas e os índices de vulnerabilidade do fator Geologia à erosão, derivados do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006), são apresentados na Figura 2.

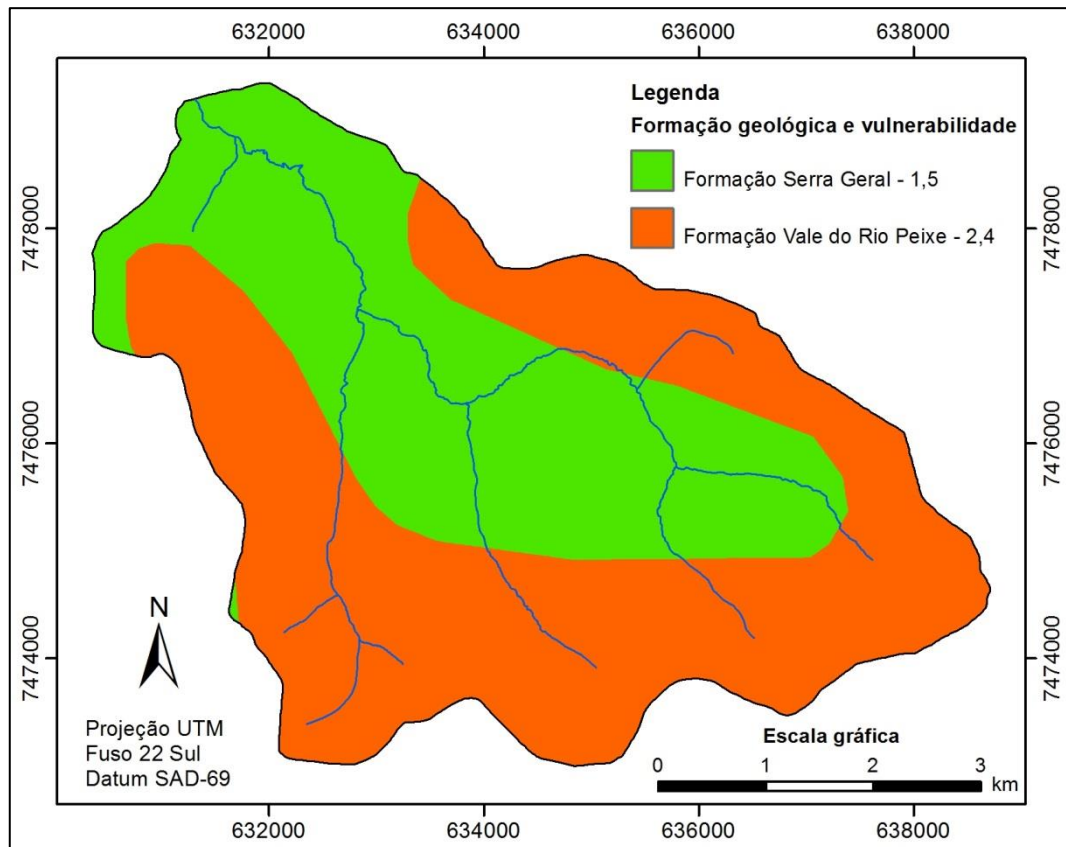


Figura 2. Geologia (G) e vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas. Adaptado de: CPRM (2006); Crepani et al. (2001).

Embora a escala do mapa base comprometa a precisão dos limites entre as formações geológicas e estes limites não sejam naturalmente bem definidos, observa-se que as porções central, norte e noroeste da área de estudo apresentam a Formação Serra Geral, que ocupa 42,14 % da área total e possui menor vulnerabilidade à erosão da principal rocha característica (basalto – 1,5) que as áreas caracterizadas pela Formação Vale do Rio Peixe, situadas nas proximidades dos divisores de águas da sub-bacia, cuja rocha característica é o arenito, rocha sedimentar de menor grau de coesão entre seus minerais que ocupa 57,86 % de sua área total. A formação geológica da sub-bacia do Ribeirão das Perobas tem influência direta na textura e comportamento hidrológico dos seus solos.

A amplitude altimétrica das sub-bacias dos afluentes ou diferentes vertentes

do rio principal da área de estudo, bem como seus respectivos valores de vulnerabilidade à erosão, é apresentada na Figura 3.

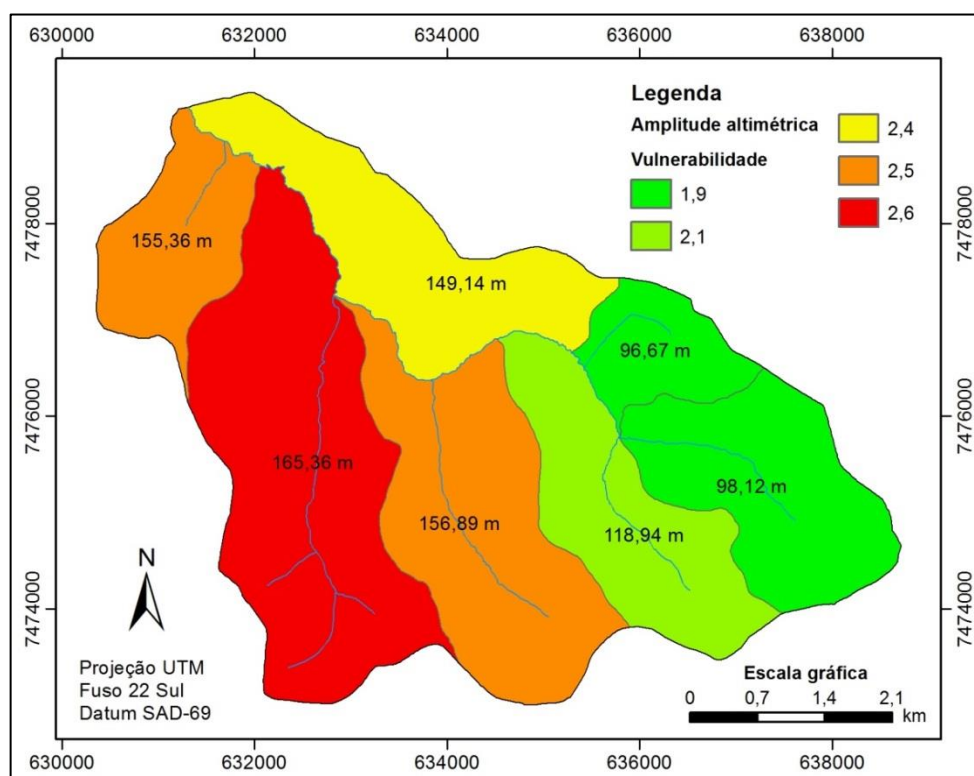


Figura 3. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas para a amplitude altimétrica dos afluentes.

As sub-bacias situadas na porção leste da área de estudo, que constituem as duas principais nascentes do Ribeirão das Perobas e um afluente, apresentaram os menores índices de vulnerabilidade à erosão em função da ocorrência de solos de textura arenosa ou média que favorecem a infiltração da água pluvial e, conseqüentemente, a redução do *runoff* e uma menor dissecação do relevo pelo aprofundamento da rede de drenagem, assim como a redução do regime hídrico dos rios e da energia potencial do escoamento superficial em função dos menores comprimentos de rampa. Nas sub-bacias situadas a noroeste (Córrego do Saltinho), oeste/sudoeste (Córrego da Liberdade) e centro-sul (Córrego da Areia Branca), a dissecação do relevo pela rede de drenagem é maior em função do maior escoamento superficial da água pluvial em solos de textura argilosa ou muito argilosa ou da proximidade da foz do rio principal, que faz com que o volume de água e a vazão sejam maiores. Em geral, as altitudes máximas e mínimas destas sub-bacias são inferiores às situadas a leste da área de estudo.

As variáveis medidas para obtenção da densidade de drenagem foram:

- Comprimento total da rede de drenagem (L): 22,7076 km;
- Área da bacia hidrográfica (A): 30,6110 km²;
- Densidade de drenagem (Dd): 0,7418 km/km².

A densidade de drenagem da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas é referida como “baixa” a partir da classificação de Florenzano (2008), e seu índice de vulnerabilidade à erosão é 1,1, de acordo com a Tabela 3. A baixa densidade de drenagem evidencia o predomínio de solos e rochas permeáveis, que contribuem para a redução do volume de água pluvial em superfície, resultando em menor quantidade de água a ser drenada aos fundos de vale através das vertentes e em menor número de canais e volume de água nos rios, ou seja, menor capacidade erosiva dos rios e do escoamento superficial.

A vulnerabilidade à erosão para o subfator declividade da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas é apresentada na Figura 4, quantificada de acordo com os intervalos da Tabela 4.

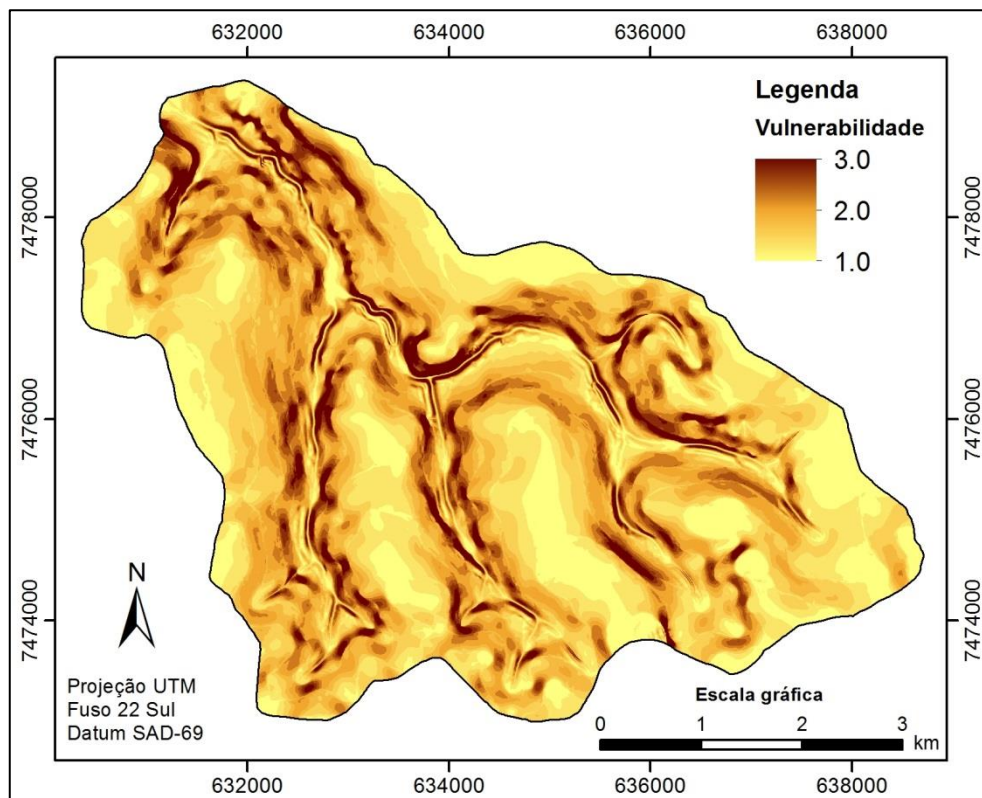


Figura 4. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas para a declividade das encostas.

Observam-se no mapa áreas de vulnerabilidade à erosão igual a 1,0, áreas

planas situadas nos divisores de águas e nos topos da sub-bacia, assim como áreas de relevo forte ondulado a escarpado nas médias e baixas vertentes, onde a velocidade do escoamento superficial é maior e a vulnerabilidade à erosão é igual ou pouco inferior a 3,0.

A Figura 5 sintetiza os índices de vulnerabilidade dos subfatores amplitude altimétrica, densidade de drenagem e declividade da sub-bacia do Ribeirão das Perobas, e apresenta a vulnerabilidade à erosão para o fator Geomorfologia.

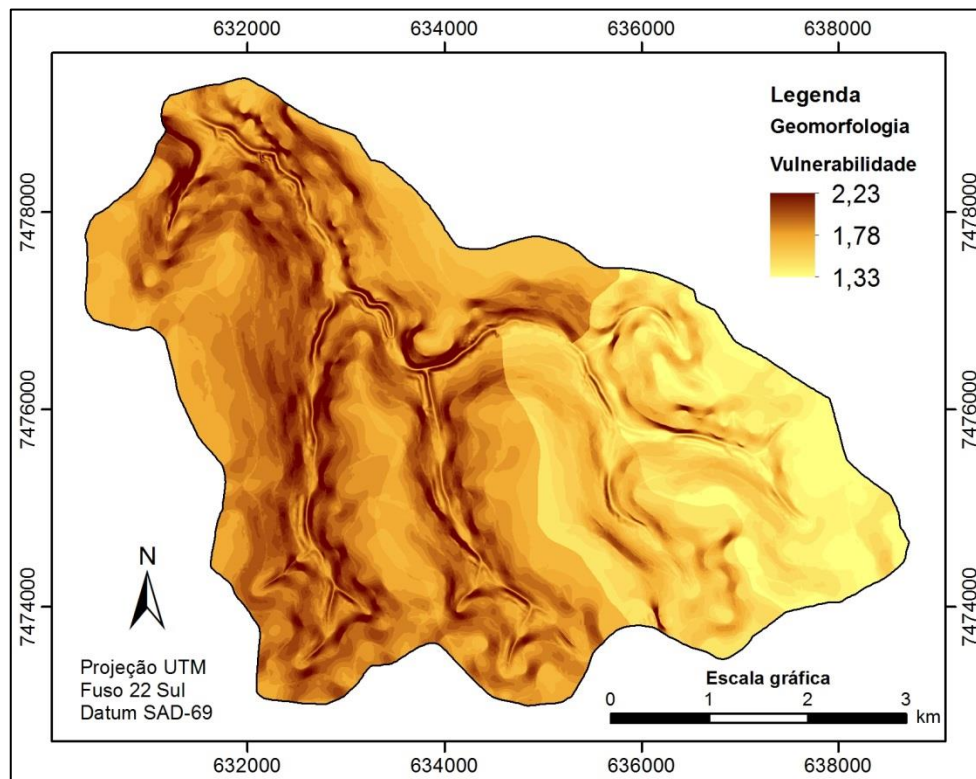


Figura 5. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas para o fator Geomorfologia (R).

A vulnerabilidade para o fator Geomorfologia é menor nas sub-bacias localizadas a leste da área de estudo em razão da menor amplitude altimétrica. O subfator densidade de drenagem, de valor 1,1, promoveu a redução dos valores médios de vulnerabilidade à erosão em toda a bacia hidrográfica. O índice de vulnerabilidade relacionado ao relevo varia entre 1,33 e 2,23, evidenciando o forte predomínio da pedogênese, o equilíbrio pedogênese/morfogênese e o leve predomínio da morfogênese ao longo deste intervalo.

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, o mapa detalhado de solos da sub-bacia do Ribeirão das Perobas elaborado por Demarchi (2012) e o mapa de vulnerabilidade à erosão para o fator solos (S), com índices descritos na Tabela 5.

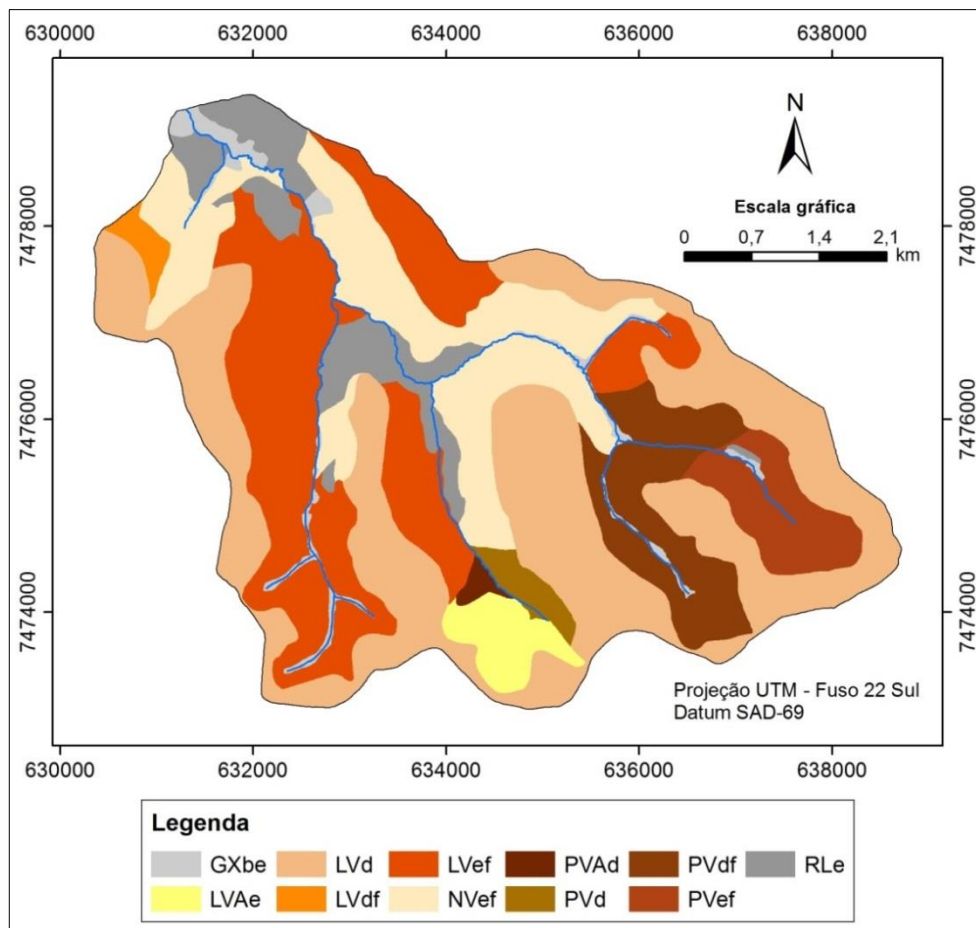


Figura 6. Mapa detalhado de solos da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.
 Fonte: Demarchi (2012).

Considerando que o grau de vulnerabilidade à erosão para o fator solos está relacionado ao seu grau de desenvolvimento ou maturidade em detrimento dos atributos físicos, químicos e morfológicos, a classe dos Latossolos possui vulnerabilidade 1,0 e representa as unidades de paisagem estáveis, ocupando 60,94 % da área da sub-bacia, apesar de apresentar diferentes texturas (textura média para os Latossolos Vermelhos Distróficos e Latossolos Vermelho-Amarelos Eutróficos e textura argilosa para os Latossolos Vermelhos Eutroféricos e Distroféricos), diferentes atributos químicos e porosidades.

Os Argissolos e Nitossolos pertencem às unidades de paisagem intermediárias, de vulnerabilidade 2,0, e ocupam 29,70 % da área de estudo, com predomínio dos Nitossolos (16,10 %). Estes solos são menos profundos, menos estáveis e menos intemperizados que os Latossolos, ocorrem em terrenos de maior declividade e apresentam gradiente textural entre os horizontes A e B ocasionada pelo acúmulo de argila iluvial, o que dificulta a infiltração de água no perfil e favorece

os processos erosivos.

Os Gleissolos e Neossolos, que juntos ocupam 9,36 % da área de estudo nos fundos de vale e áreas de declividade acentuada, respectivamente, pertencem às unidades de paisagem vulneráveis à erosão. São solos pouco desenvolvidos com pequena evolução dos perfis de solo a partir dos materiais depositados (Gleissolos) ou em razão da intensidade do processo erosivo ser maior que a taxa de formação dos solos em áreas de alta declividade (Neossolos), e apresentam índice 3,0 de vulnerabilidade à erosão. Cabe ressaltar o índice de vulnerabilidade para o fator solo utilizado neste trabalho difere do fator erodibilidade do solo utilizado na estimativa de perda de solo por erosão, o qual é função da textura, estrutura, permeabilidade e teor de matéria orgânica do solo, entre outros atributos.

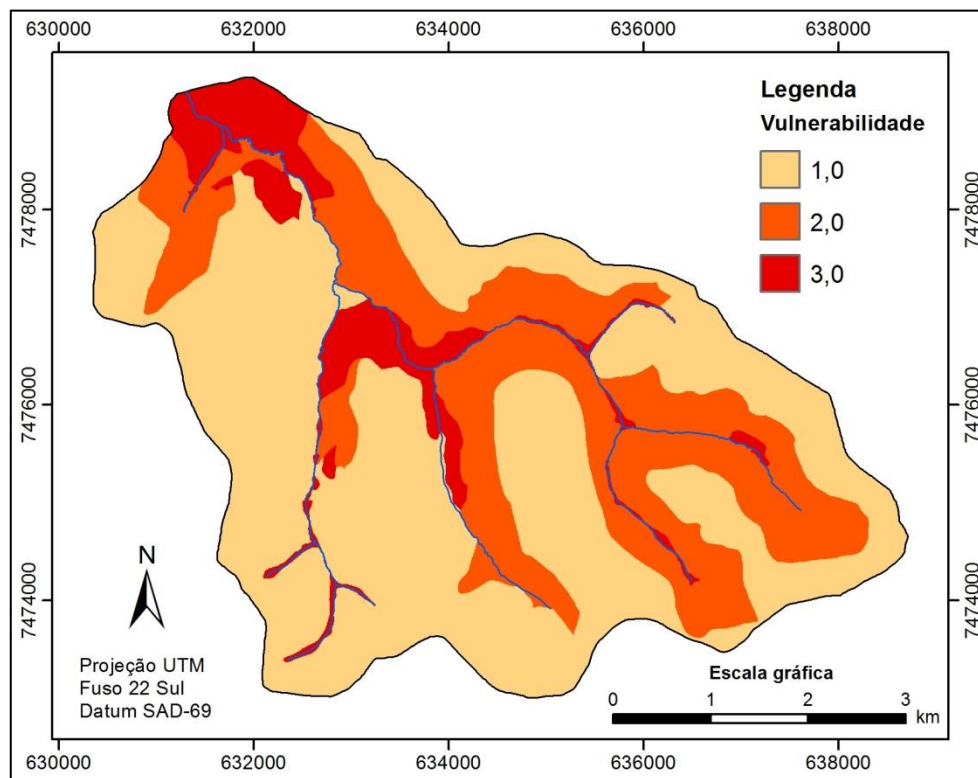


Figura 7. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas para os Solos (S).

Os mapas de uso da terra e de vulnerabilidade à erosão da sub-bacia do Ribeirão das Perobas para o fator Vegetação/uso da terra referentes ao mês de janeiro de 2011 são apresentados nas Figuras 8 e 9. Como a mata nativa e/ou ciliar, que constitui a sua vegetação original, ocupa apenas 7,41 % da área de estudo, os índices de vulnerabilidade à erosão utilizados, encontrados na literatura, procuram

quantificar o grau de proteção ao solo oferecido pelas atividades agropecuárias e antrópicas em função das diferentes densidades de cobertura vegetal. Nesse sentido, os meios estáveis e favoráveis à pedogênese são representados pelas áreas onde a mata nativa (Floresta Estacional Semidecidual) e ciliar estão preservadas, além dos espelhos d'água dos açudes, e ocupam 7,51 % da área total da sub-bacia.

Nas áreas ocupadas por reflorestamento com eucalipto e pastagens, aqui consideradas as pastagens manejadas, sem manejo e degradadas, de vulnerabilidade 2,0, há um equilíbrio entre os processos pedogenéticos e morfogenéticos em razão da densidade média de cobertura vegetal oferecida ao solo por essas culturas. São caracterizadas por Crepani et al. (2001) como “cobertura vegetal moderadamente estável ou vulnerável” e ocupam 44,78 % da área da sub-bacia, com destaque para as pastagens (43,48 % da área), que se distribuem por todos os seus compartimentos de relevo.

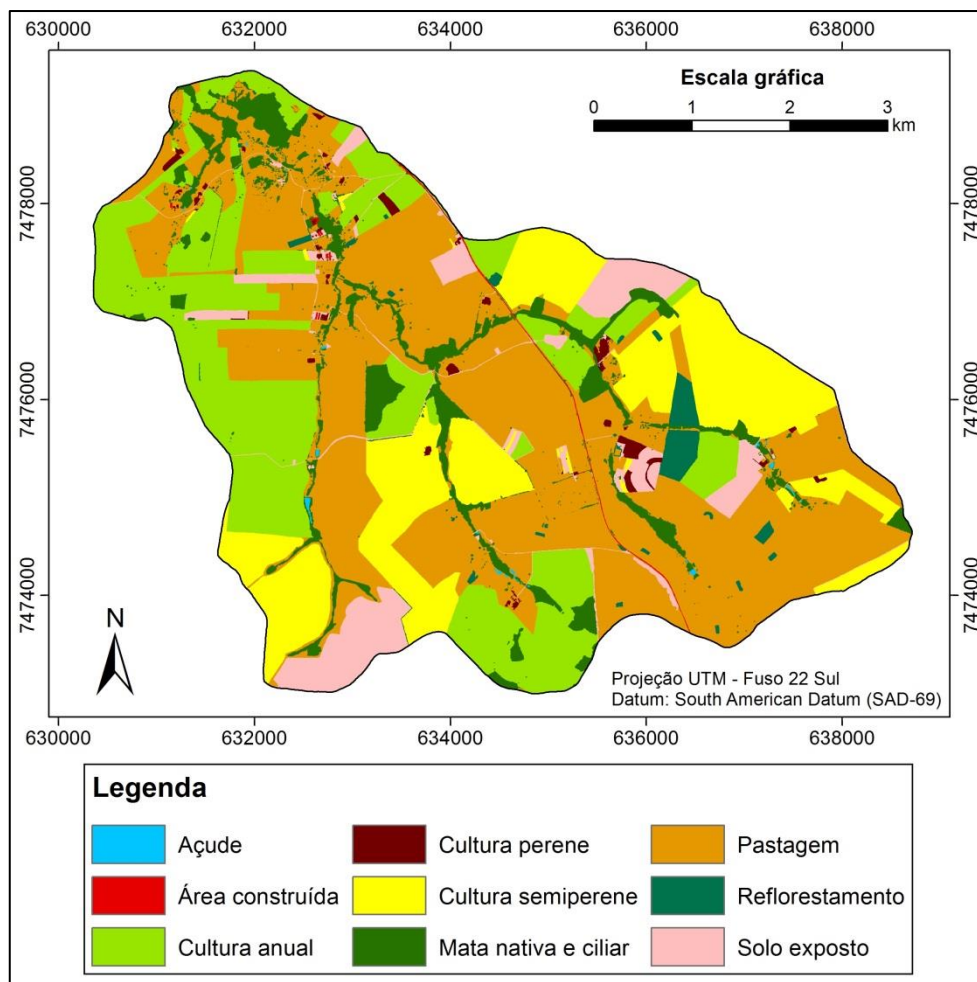


Figura 8. Mapa de uso da terra da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.
Adaptado de: Demarchi (2012).

Nas áreas ocupadas pelas culturas anuais (mandioca, milho e soja), culturas semiperenes (cana-de-açúcar) e culturas perenes (fruticultura e café), que ocupam 22,16 %, 17,80 % e 0,78 % da área de estudo, respectivamente, os índices de vulnerabilidade à erosão são elevados com predomínio da morfogênese e aumentam de forma inversamente proporcional à densidade da cobertura vegetal e ao período de proteção ao solo, influenciados pela duração do ciclo das culturas. Às áreas construídas (rodovias e plasticultura) e de solo exposto (áreas agrícolas desprovidas de cobertura vegetal no mês de janeiro), que representam 6,97 % da sub-bacia, foi atribuído o índice máximo de vulnerabilidade (3,0) para a cobertura vegetal, representando máxima suscetibilidade dos solos à erosão.

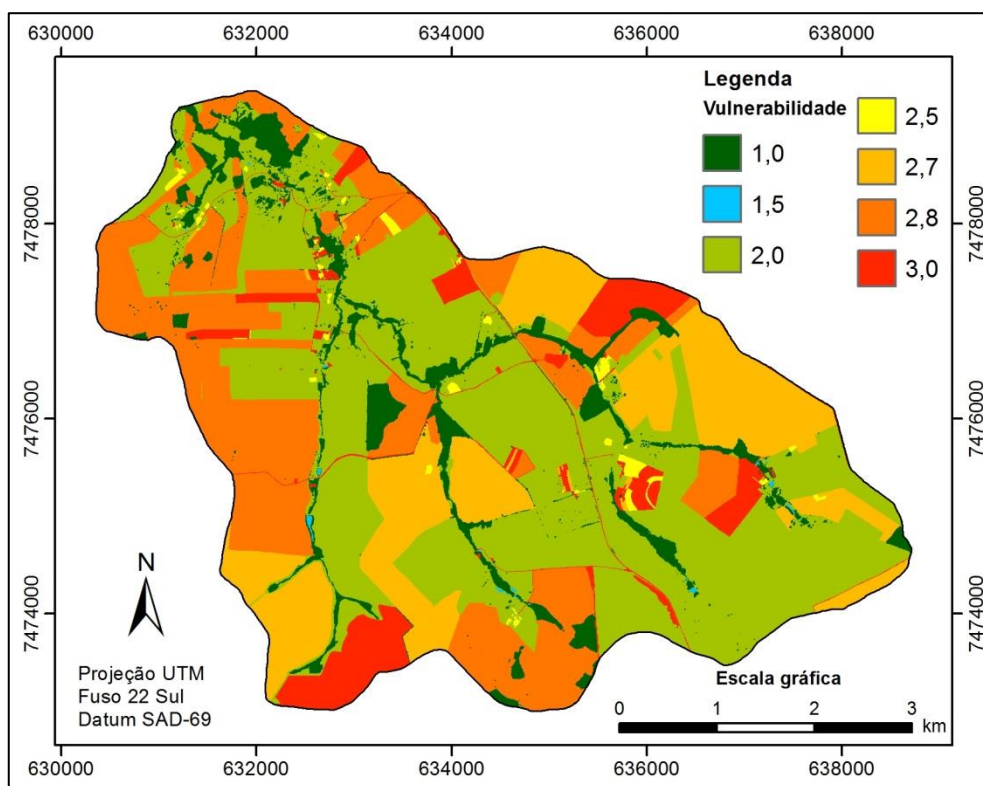


Figura 9. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas para o fator Vegetação/uso da terra (Vg).

Em relação ao fator clima de vulnerabilidade à erosão, os parâmetros médios obtidos a partir dos dados pluviométricos do posto “São Pedro do Turvo”, da série temporal de 30 anos, foram:

- Precipitação média anual: 1.332,42 mm;
- Número de dias chuvosos: 99,15;
- Número de meses chuvosos: 3,30;
- Intensidade pluviométrica: 403,09 mm/mês.

A intensidade pluviométrica média obtida ano a ano a partir dos índices pluviométricos anuais e do número de dias chuvosos foi de 409,20 mm/mês, e ambos os índices classificam a vulnerabilidade à erosão da sub-bacia para o fator clima no valor 2,5, conforme Tabela 7. Este valor de vulnerabilidade é considerado alto, favorecendo o processo erosivo e a morfogênese, sobretudo em razão do baixo número de meses chuvosos. Embora a estação chuvosa do município de Santa Cruz do Rio Pardo ocorra de setembro a março (DEMARCHI, 2012) tendo os meses de janeiro, dezembro e novembro como os mais chuvosos, o número médio de dias de chuva é de apenas 99,15 dias, ou seja, todas as chuvas ocorrem em apenas 27,16 % dos dias do ano ou pouco mais de três meses.

A Figura 10 apresenta o mapa de vulnerabilidade à erosão da sub-bacia do Ribeirão das Perobas, resultado da média aritmética dos fatores Geologia, Relevo, Solos, Vegetação/Usos da terra e Clima anteriormente descritos, e a Tabela 9 apresenta as áreas ocupadas pelas classes e pelos diferentes graus de vulnerabilidade das unidades de paisagem.

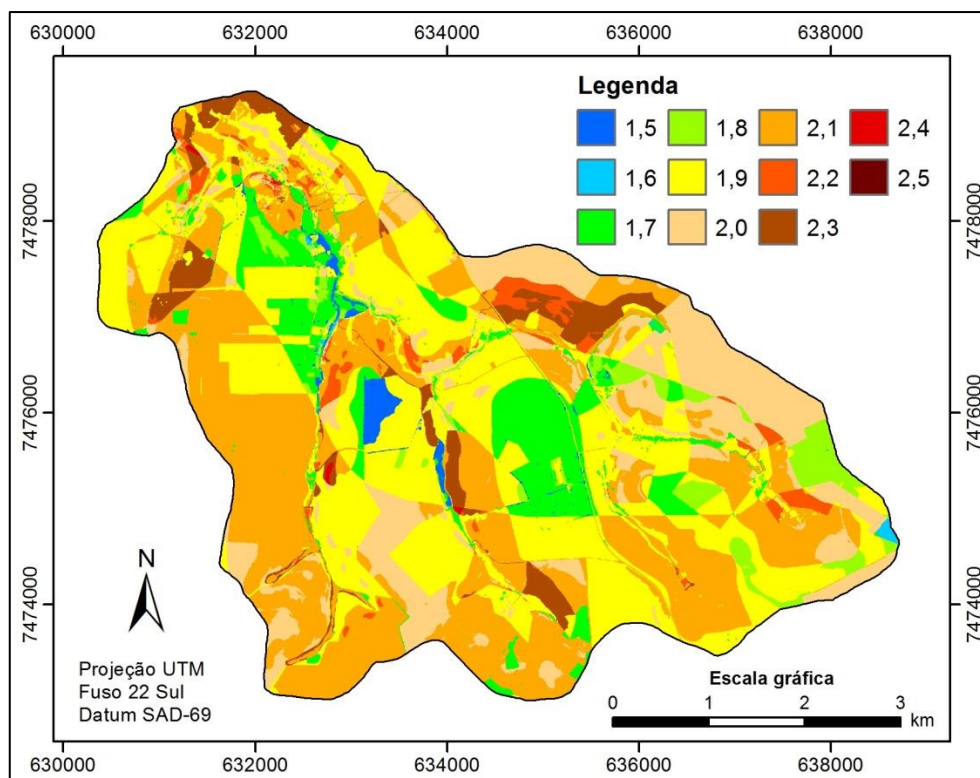


Figura 10. Vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.

Tabela 9. Área das classes de vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas

Vulnerabilidade	Área (km²)	Área (%)	Grau de vulnerabilidade	Área (%)
1,5	0,33	1,1	Moderadamente estável	10,35
1,6	0,05	0,18		
1,7	2,77	9,07		
1,8	1,02	3,34	Medianamente estável / vulnerável	85,04
1,9	9,74	31,83		
2,0	4,63	15,13		
2,1	9,95	32,5		
2,2	0,68	2,24		
2,3	1,38	4,51	Moderadamente vulnerável	4,61
2,4	0,03	0,09		
2,5	0,001	0,01		

A análise dos dados permite inferir que predomina na área de estudo a categoria morfodinâmica intermediária, de vulnerabilidade ao redor de 2,0, caracterizada pelo equilíbrio na relação morfogênese/pedogênese. As classes de vulnerabilidade 1,9 a 2,1 representam 79,46 % da área da sub-bacia, e embora estejam predominantemente ocupadas pela agropecuária com culturas perenes, semiperenes, anuais e pastagens, sua constituição resulta da combinação entre os cinco fatores naturais da metodologia utilizada. É necessário destacar que o fator Clima, avaliado através do parâmetro intensidade pluviométrica, e o subfator densidade de drenagem (fator Relevo) apresentaram valores de vulnerabilidade únicos em toda a sub-bacia, porém, o primeiro fator teve influência negativa na configuração da vulnerabilidade à erosão por apresentar número de dias de chuva equivalente a pouco mais de três meses e elevada intensidade pluviométrica. Em relação à densidade de drenagem, considerada baixa segundo critérios de Florenzano (2008), esta apresentou influência positiva na constituição do fator Relevo em relação à vulnerabilidade ao processo erosivo, pois denota a reduzida dissecação do relevo pela drenagem que dá origem a paisagens estáveis.

A Figura 11 apresenta as classes qualitativas de vulnerabilidade à erosão das unidades de paisagem da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, obtidas a partir da classificação expressa na Tabela 8.

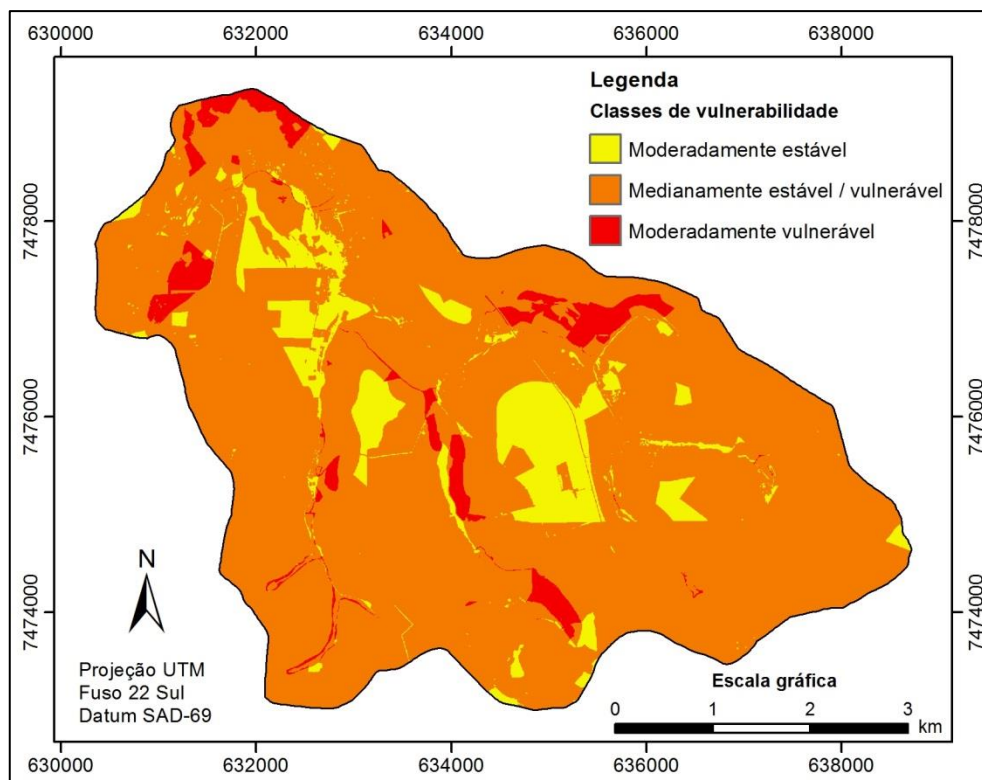


Figura 11. Classes de vulnerabilidade à erosão das unidades de paisagem da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas.

As unidades de paisagem da área de estudo definidas de acordo com o grau de vulnerabilidade à erosão são caracterizadas abaixo:

- **Unidades de paisagem moderadamente estáveis (1,5 a 1,7):** ocupam 10,35 % da área da sub-bacia do Ribeirão das Perobas, com predomínio nos divisores de águas de relevo plano e suave ondulado, mas também em áreas de relevo acidentado nas médias e baixas vertentes. Assentam-se sobre os Latossolos Vermelhos Distróficos, Distroférricos e Eutroférricos, de vulnerabilidade igual a 1,0, e predominam sobre a Formação Serra Geral, cuja vulnerabilidade da rocha característica é 1,5. A amplitude altimétrica é variável, e os usos da terra predominantes são mata nativa, mata ciliar e pastagem, de baixa e média vulnerabilidade à erosão. Nestas unidades de paisagem, predominam os processos pedogenéticos, embora sua maior parte apresente índice de vulnerabilidade de 1,7 (9,07 % da área da sub-bacia);

- **Unidades de paisagem medianamente estáveis/vulneráveis (1,8 a 2,2):** de maior ocorrência na área de estudo (85,04 % de sua área total), estas unidades de paisagem são caracterizadas pela grande variabilidade na constituição de suas

características naturais, sendo seus principais usos da terra as pastagens, culturas anuais (mandioca nas menores declividades, milho e soja), culturas semiperenes (cana-de-açúcar), culturas perenes (café e fruticultura), reflorestamento com eucalipto nas maiores declividades, solo exposto nos terrenos de baixa e média declividade, mata ciliar e mata nativa sobre terrenos acidentados, ou seja, culturas de diferentes graus de vulnerabilidade à erosão. Compreendem a formação geológica Vale do Rio Peixe, predominantemente, mas também a formação Serra Geral; apresentam relevos de diferentes declividades e amplitudes altimétricas e solos de diferentes graus de vulnerabilidade à erosão (Latosolos, Nitossolos, Argissolos, Neossolos e Gleissolos). O equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese é resultado das diferentes combinações entre seus fatores naturais;

- **Unidades de paisagem moderadamente vulneráveis (2,3 a 2,5):** ocupam apenas 4,61 % da área da sub-bacia. Encontram-se sobre as duas formações geológicas presentes na área de estudo, de vulnerabilidade à erosão 1,5 e 2,4, e em solos de vulnerabilidade média (Argissolos e Nitossolos) e alta (Neossolos Litólicos e Gleissolos, estes localizados em áreas não ocupadas por mata nativa ou ciliar). O relevo apresenta amplitude altimétrica e declividades variadas, mas predominam as classes de declive de relevo ondulado (6 – 12 %), forte ondulado (12 – 20 %) e montanhoso (20 – 40 %). Os principais usos da terra são: culturas anuais (soja, milho e mandioca), semiperenes (cana-de-açúcar), solo exposto e pastagens, estas cultivadas em terrenos de maior declividade. Nesta unidade de paisagem, a vulnerabilidade natural ao processo erosivo é resultado do predomínio dos processos morfogenéticos sobre os processos pedogenéticos. A classe de vulnerabilidade 2,3 ocupa quase a totalidade desta unidade de paisagem (4,51 % da área da sub-bacia).

Embora a metodologia utilizada para cruzamento dos mapas de fatores tenha sido pixel a pixel, em que cada célula é processada separadamente das demais, o mapa de vulnerabilidade à erosão das unidades de paisagem apresentou inúmeras áreas homogêneas de índice de vulnerabilidade, resultado da continuidade espacial ou da correlação entre os fatores, a exemplo da área homogênea situada no centro da sub-bacia, de vulnerabilidade à erosão 1,8, cujas principais características são relevo plano, formação geológica Serra Geral, solo Latossolo Vermelho Distrófico, ocupação por pastagens e elevada vulnerabilidade climática, comum a toda a área

de estudo. Os pixels individuais do mapa de vulnerabilidade à erosão são consequências, principalmente, da variação no uso da terra e na declividade.

A avaliação da vulnerabilidade natural à erosão e a classificação da sub-bacia do Ribeirão das Perobas em unidades de paisagem de acordo com o grau de vulnerabilidade, cuja metodologia foi concebida para subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico em conjunto com a avaliação da potencialidade socioeconômica das unidades territoriais, também pode ser empregada no planejamento de uso agrícola das terras a partir do plantio de culturas agrícolas, das práticas conservacionistas e do manejo do solo adequados, com tomadas de decisão baseadas na vulnerabilidade ao processo erosivo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Zoneamento Ecológico-Econômico demanda metodologias e técnicas eficientes e de fácil implementação para a análise da vulnerabilidade ambiental das unidades de paisagem e da potencialidade socioeconômica das unidades territoriais, as quais são supridas pelas técnicas de Sensoriamento Remoto e de Geoprocessamento, implementadas nos Sistemas de Informação Geográficas. Essas técnicas facilitam o cruzamento dos dados e obtenção de parte deles, mas não reduzem a importância do conhecimento teórico, do conhecimento da área de estudo, dos trabalhos de campo e da experimentação em campo e laboratório.

O uso da metodologia de Crepani et al. (2001) com algumas adaptações para a realidade da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas permitiu o conhecimento de sua morfodinâmica e a sua classificação em unidades de paisagem de acordo com o grau de vulnerabilidade natural à perda de solo por erosão, podendo fornecer subsídios ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao planejamento agrícola da área de estudo. A vulnerabilidade à erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas variou de 1,5 a 2,5, separadas em três unidades de paisagem: moderadamente estáveis (10,35 %), medianamente estáveis/vulneráveis (85,04 %) e moderadamente vulneráveis (4,61 % da área total da sub-bacia).

5 REFERÊNCIAS

ARNESEN, A. S.; GENOFRE, F. T.; CURTARELLI, M. P. Análise da vulnerabilidade

à erosão através de SIG: um subsídio ao zoneamento ecológico-econômico de Santo Amaro da Imperatriz/SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2009. p. 1-20. Disponível em: <http://www.gthidro.ufsc.br/arquivos/Análise_Vul_Erosão1.pdf>. Acesso em: 15 maio 2012.

BATISTA, C. T.; VERÍSSIMO, C. U. V. Vulnerabilidade geoambiental da Região Metropolitana de Fortaleza: análise comparativa de dois métodos com enfoque a processos erosivos. **Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 47-56, jan./abr. 2012. Disponível em: <http://geociencias.no-ip.org/31_1/Art04_Batista_&_Verissimo.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2013.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. **Detalhamento da metodologia para execução do Zoneamento Ecológico-Econômico pelos estados da Amazônia Legal**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Assuntos Estratégicos, 1996. Disponível em: <http://www.laget.igeo.ufrj.br/egler/pdf/Metodo_ZEE.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Ícone, 2005. 355 p.

BRANDÃO, R. L. **Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza**. Texto Explicativo. Sistema de Informação para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza – Projeto Sinfor. Fortaleza: CPRM, 1995. 34 p.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. 594 p.

CASTRO, O. M. Conservação do solo e qualidade dos sistemas produtivos. **O Agrônomo**, Campinas, v. 42, n. 2/3, p. 110-117, 1991.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Brasília: CPRM, 2006. Escala: 1:750.000.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F. **Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. (INPE-11237-RPQ/760). Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/dsr/simeao/Publicacoes/Intensidade_Pluiom%20trica.pdf>. Acesso em: 18 maio 2012.

CREPANI, E. et al. **Curso de Sensoriamento Remoto aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. (INPE-6145-PUD/82). Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/05.13.15.34/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 18 maio 2012.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico Econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. (INPE 8454-RPQ/722).

Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/dsr/simeao/Publicacoes/SERGISZEE3.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2012.

CREPANI, E. et al. Zoneamento Ecológico-Econômico. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 10, p. 285-318.

DEMARCHI, J. C. **Geotecnologias aplicadas à estimativa de perdas de solo por erosão hídrica na Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

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

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. **ArcGIS / ArcMap**. Professional GIS for the desktop, release 9.3.1. Redlands, 2009.

FLORENZANO, T. G. Cartografia. In: _____ (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 4, p. 105-128.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. cap. 4, p. 149-209.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Carta topográfica: folha Santa Cruz do Rio Pardo – SF-22-Z-A-VI-4**. Serviço Gráfico do IBGE, 1973. Escala 1:50.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004. Escala: 1:500.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (São Paulo). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala: 1:500.000.

LAGE, C. S.; PEIXOTO, H.; VIEIRA, C. M. B. Aspectos da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Rio Corrente – BA. **GeoTextos**, Salvador, v. 4, n. 1-2, p. 11-36, jan./dez. 2008. Disponível em: <<http://www.portalseer.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/3293/2407>>. Acesso em: 21 maio 2012.

MIRANDA, M. J. et al. **Clima dos municípios paulistas**. CEPAGRI/UNICAMP, 2005. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em 20 abr. 2012.

PALMEIRA, A. F. **Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicadas à gestão do território do Município de Paragominas (Estado do Pará)**. 2004. 260 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 11, n. 5, p.1633-1644, October, 2007. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/hess-11-1633-2007.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2012.

PRUSKI, F. F. Prejuízos decorrentes da erosão hídrica e tolerância de perdas de solo. In: _____ (ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009. p. 13-23. (cap.1)

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 628-636, nov./dez. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000600012>>. Acesso em: 17 maio 2012.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH-USP, 1997. Escala: 1:500.000.

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

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e assoreamento. In: SANTOS, R. F. (org.). **Vulnerabilidade ambiental**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. cap. 4, p. 39-58.