



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

NELSON GIOVANINI JUNIOR

Análise e Aplicação de Metodologias de Predição de Processos Erosivos
Utilizando SIG na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, Nova Canaã
Paulista - SP

Ilha Solteira
2019





PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NELSON GIOVANINI JUNIOR

**Análise e Aplicação de Metodologias de Predição de Processos Erosivos
Utilizando SIG na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, Nova Canaã
Paulista - SP**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
mestre em Engenharia Civil.

Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima
Orientador

Ilha Solteira
2019



FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G512a Giovanini Junior, Nelson.
Análise e aplicação de metodologias de predição de processos erosivos utilizando SIG na bacia hidrográfica do Córrego do Engano, Nova Canaã Paulista - SP / Nelson Giovanini Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
145 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2019

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima
Inclui bibliografia

1. SIG. 2. Erosão. 3. Potencial erosivo. 4. USLE. 5.AHP.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise e Aplicação de Metodologias de Predição de Processos Erosivos Utilizando SIG na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, Nova Canãa Paulista-SP

AUTOR: NELSON GIOVANINI JUNIOR

ORIENTADOR: CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. VITOR MATHEUS BACANI
Câmpus Universitário de Três Lagoas / Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - UFMS

Ilha Solteira, 28 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu Orientador: Professor Dr. César Gustavo da Rocha Lima por todo o apoio e suporte dados durante a elaboração da dissertação ajudando sempre que possível mesmo em horários extraordinários.

E ao Prof. Dr. José Augusto de Lollo, pela coorientação em todas as etapas da dissertação.

RESUMO

A bacia hidrográfica é uma unidade geomorfológica que agrega os impactos das interferências antrópicas e naturais sobre os recursos hídricos. Mudanças significativas nas características de uma bacia, causadas por processos naturais ou atividades antrópicas, podem gerar alterações, efeitos e impactos na estabilidade biótica e abiótica do sistema, desencadeando desequilíbrios ambientais e, portanto, a degradação da paisagem. Dentre os processos causadores dessa degradação, destaca-se a erosão dos solos. A erosão é um processo geológico responsável pela remoção e pelo transporte de partículas do solo, principalmente pela ação da água das chuvas sendo um importante agente na modelagem da paisagem terrestre e na redistribuição de energia no interior da bacia hidrográfica. Neste trabalho será analisada a relação entre algumas metodologias – e suas modificações - de predição de ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano utilizando um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas. Foram aplicados três diferentes métodos: Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE), Equação Universal de Perda de Solos (USLE) e processo de análise hierárquica (AHP). Para a aplicação dos três métodos foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica com a criação de um banco de dados com diversas informações necessárias para a aplicação dos métodos, como: mapa de precipitação, erosividade, tipos de solo, erodibilidade, tipos de rochas, fatores topográficos e uso e ocupação. Para cada metodologia foi determinada a probabilidade de ocorrência de processos erosivos com base em diversos fatores gerando mapas para a visualização das regiões críticas dentro da bacia facilitando a aplicação de possíveis práticas remediadoras. Duas das três diferentes metodologias apresentaram resultados visualmente semelhantes com a predominância de uma classe “moderada” com relação a probabilidade de ocorrência erosão. Os métodos utilizando a AHP e USLE são mais semelhantes entre si quando comparados ao VNE uma vez que é possível verificar a presença de regiões similares críticas no mapa obtido através das duas metodologias. A segunda forma de cálculo da USLE foi a que melhor representou a área com informações precisas em alta resolução sendo possível a aplicação de medidas preventivas localizadas para a diminuição da probabilidade de ocorrência de processos erosivos, enquanto os outros métodos propiciaram a geração de mapas mais abrangentes, recomendado para a aplicação de práticas conservacionistas em grandes áreas.

Palavras-chave: SIG. Erosão. Potencial erosivo. USLE. AHP.

ABSTRACT

The drainage basin is a geomorphological unit that aggregates the protection of anthropic and natural interferences on water resources. Changes in the characteristics of a basin, caused by natural processes or anthropic activities, can generate changes, effects and stability in the biology and in the abiotic system, triggering environmental imbalances and, therefore, a degradation of the landscape. Among the processes that causes this degradation, there is soil erosion. Erosion is a geological process responsible for the removal and transport of soil particles, mainly by the action of rainwater, being an important agent in the modeling of the terrestrial landscape and in the redistribution of energy within a drainage basin. This work will analyze the relationship between some methodologies - and their modifications - of predicting the occurrence of erosive processes in the Corrego do Engano drainage basin using a Geographic Information Systems environment. Three different methods were applied: Natural Erosion Vulnerability (VNE), Universal Soil Loss Equation (USLE) and hierarchical analysis process (AHP). For the application of the three methods was used a Geographic Information System with the creation of a database with several information needed to work with these methods, such as: precipitation map, erosivity, soil types, erodibility, types of rocks, factors topography and land use. For each methodology was determined the probability of occurrence of erosive processes based on several factors generating maps for the visualization of the critical regions within the basin facilitating the application of possible remedial practices. Two out of the three different methodologies presented visually similar results with the predominance of a "moderate" class in relation to the probability of occurrence erosion. The methods using the AHP and USLE are more similar to each other when compared to the VNE since it is possible to verify the presence of similar critical regions in the map obtained through the two methodologies. The second method of calculating the USLE was the one that best represented the area with accurate information in high resolution being possible the application of localized preventive measures to reduce the probability of occurrence of erosive processes, while the other methods allowed the generation of broader maps, recommended for the application of conservation practices in large areas.

Keywords: GIS. Erosion. Erosion potential. USLE. AHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores relacionados com a ocorrência ou não de erosão.	20
Figura 2 - Impacto da gota de chuva no solo	22
Figura 3 - Forma do declive: côncavo e convexa	26
Figura 4 - Atividades humanas e implicações no processo de degradação das terras.	32
Figura 5 - Etapa do processo de gestão ambiental com relação ao controle de processos erosivos.	33
Figura 6 - Erosão por sulco (a), erosão por sulcos profundos - ravinas (b) e voçoroca (c) em área rural de Corumbataí, SP.	36
Figura 7 – Representação esquemática geral de utilização do SIG	16
Figura 8 - Componentes de um SIG	18
Figura 9 - Visualização dos layers aplicados ao bando de dados de um SIG	20
Figura 10 - Exemplo de análises utilizando as camadas de dados de um SIG para a avaliação do potencial de erosão.....	21
Figura 11 - Fluxo de tratamento dos dados SRTM para a elaboração do MDE	23
Figura 12 - Métodos de avaliação da erosão hídrica.....	24
Figura 13 - Diagrama de aplicação dos parâmetros da USLE.....	30
Figura 14 - Exemplo de avaliação de critério múltiplos. (A) Lógica Boleana e (B) Ponderamento dos Fatores.....	33
Figura 15 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	46
Figura 16 - Distribuição das chuvas para o município de Nova Canaã Paulista	47
Figura 17 - Cartas de declividade e altitude da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	48
Figura 18 - Mapa de Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	51
Figura 19 - Divisão das áreas de imóveis rurais da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	52
Figura 20 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	53
Figura 21 - Mapa de susceptibilidade à erosão e pontos conhecidos de processos erosivos	60
Figura 22 – Pontos com processos erosivos em 2018 na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano.....	61
Figura 23 – Imagens dos processos erosivos locados e georreferenciados.....	62
Figura 24 – Organograma de aplicação da metodologia de Crepani <i>et al.</i> (2001) utilizando o software SPRING 5.5.2	66
Figura 25 – Mapa litológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano.....	69
Figura 26 – Ponderação do tema geomorfologia	70
Figura 27 – Mapa de amplitude altimétrica	72
Figura 28 – Mapa de Amplitude Interfluvial	74
Figura 29 – Organograma mostrado as etapas adotadas para as duas formas de cálculo da USLE	80

Figura 30 – Mapa de Erodibilidade para cálculo da USLE obtido por Krigagem	82
Figura 31 – Interface do programa netErosividade - SP	83
Figura 32 - Mapa de Erosividade para cálculo da USLE obtido pelo netErosividade	84
Figura 33 – Mapa do Fator L referente aos comprimentos de rampa para calculo da USLE	85
Figura 34 – Organograma de cálculo para o Fator LS da forma de cálculo 1.....	87
Figura 35 – Mapa dos fatores topográficos LS para a forma de cálculo 1 da USLE	87
Figura 36 – Mapa dos fatores topográficos LS a serem utilizados na forma de cálculo 2 da USLE	88
Figura 37 – Mapa de vulnerabilidade VNE com divisões em classes de vulnerabilidade.....	96
Figura 38 - Mapa de vulnerabilidade VNE com divisões em cores do espectro do visível.....	97
Figura 39 – Comparações entre a metodologia Crepani <i>et al.</i> (2001) e os pontos alocados para a área. (a) pontos visualizados por imagens de satélites; (b) pontos presentes no relatório SigRH; (c) mapa de estabilidade da área; (d) e (e) comparação entre áreas	99
Figura 40 – Mapa de Perdas de Solos para a primeira forma de cálculo da USLE	101
Figura 41 – Cluster de regiões com maior perda de solo para o primeiro cálculo .	103
Figura 42 – Mapa de Classes de potencial de ocorrência de processos erosivos de acordo com a perda de solo.....	105
Figura 43 - Mapa de Perdas de Solos para a segunda forma de cálculo da USLE	107
Figura 44 - Cluster de regiões com maior perda de solo para o segundo cálculo .	109
Figura 45 - Mapa de Classes de potencial de ocorrência de processos erosivos de acordo com a perda de solo.....	110
Figura 46 – Comparações pontuais entre as duas formas de cálculo da USLE	114
Figura 47 – Mapa de potencial erosivo conforme metodologia AHP	117
Figura 48 – Cluster de regiões com alto potencial de ocorrência de processos erosivos	118
Figura 49 – Pastagem de uso extensivo na Bacia do Córrego do Engano. Localização: lat. 20 22 7.4575; long. 50 53 41.7544	119
Figura 50 - Pomar na Bacia do Córrego do Engano. Localização: lat. 20 26 34.42525; long. 50 53 7.7105	120
Figura 51 – Ausência de qualquer prática conservacionista. Localização: lat. 20 21 52.0628; long. 50 51 20.7998	121
Figura 52 – Precariedade das práticas conservacionistas. Localização: lat. 20 21 52.097 e long. 50 51 20.7861	121
Figura 53 - Voçoroca próximo ao encontro entre um copo hídrico e estrada rural. Localização: lat. 20 22 4.1752; long. 50 53 43.2925	122
Figura 54 – Localização de diversas áreas degradadas por processos erosivos dentro da Bacia do Córrego do Engano	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da intensidade da precipitação sobre a perda de solo	23
Tabela 2 - Distribuição das classes de declividades	24
Tabela 3 - Tipos de uso indicado para diversos intervalos de classe de declive	25
Tabela 4 - Graus de proteção por tipos de cobertura vegetal.....	28
Tabela 5 - Propriedades do solo que afetam os processos erosivos.....	29
Tabela 6 - Classes de fragilidade do solo	30
Tabela 7 - Tipos de erosão e agentes causadores.	34
Tabela 8 - Características dos processos erosivos (continua)	39
Tabela 9 - Características morfométricas de bacias hidrográficas.	12
Tabela 10 - Principais softwares na área de geoprocessamento	15
Tabela 11 – Principais Modelos Quantitativos Indiretos	26
Tabela 12 – Principais métodos para obtenção dos fatores utilizados na RUSLE e USLE.	29
Tabela 13 – Matriz de comparação par a par.....	34
Tabela 14 – Matriz de Padronização dos pesos.....	35
Tabela 15 – Quantificação das classes de uso e ocupação	50
Tabela 16 - Divisão de tamanho das propriedades	50
Tabela 17 Principais características morfométricas de uma Bacia Hidrográfica.....	55
Tabela 18 - Informações morfométricas da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano	56
Tabela 19 – Escala de Vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas	64
Tabela 20 – Escala de vulnerabilidade das rochas mais comuns.....	68
Tabela 21 – Valores de vulnerabilidade dos solos	69
Tabela 22 – Classes de declividade com os respectivos valores da escala de vulnerabilidade.....	71
Tabela 23 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica.....	72
Tabela 24 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial	73
Tabela 25 – Valores de vulnerabilidade à erosão associados às classes de uso do solo	75
Tabela 26 - Escala de intensidade pluviométrica e valores de vulnerabilidade à erosão.....	76
Tabela 27 – Valores do Fator C para o uso de solo na forma de cálculo 1 da USLE	90
Tabela 28 - Valores do Fator C e P para o uso de solo na forma de cálculo 2 da USLE	90
Tabela 29 – Potencial de ocorrência de erosão e notas adotadas	91
Tabela 30 – Matriz de comparação par a par para os fatores analisados	91
Tabela 31 – Divisão das classes de fragilidade para a declividade	92
Tabela 32 – Divisão de classes para o uso e ocupação do solo	93
Tabela 33 – Matriz de comparação par a par com os pesos para cada fator	93

Tabela 34 - Medida de classes	95
Tabela 35 – Perda de solo e área ocupado para primeira forma de cálculo da USLE	100
Tabela 36 – Subdivisões da perda de solo conforme seu potencial em causar processos erosivos	104
Tabela 37 - Perda de solo e área ocupado para segunda forma de cálculo da USLE	106
Tabela 38 - Subdivisões da perda de solo conforme seu potencial em causar processos erosivos para a segunda forma de cálculo da USLE.....	111
Tabela 39 – Grau de probabilidade e área ocupado obtido pelo Método AHP	116

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	ASPECTOS CIENTÍFICOS RELACIONADOS AO CONCEITO DE EROSÃO	17
2.1.1	DEFINIÇÃO	17
2.1.2	FATORES CONDICIONANTES NA FORMAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	20
2.1.2.1	Impacto da chuva e a influência na erosividade	21
2.1.2.2	Relevo e suas implicações nos processos erosivos	23
2.1.2.3	Cobertura da área	27
2.1.2.4	Solos e a erodibilidade	29
2.1.2.5	Ações antrópicas	31
2.2	TIPOS DE EROSÃO	33
2.2.1	EROSÃO GLACIAL	34
2.2.2	EROSÃO EÓLICA	34
2.2.3	EROSÃO HÍDRICA	35
2.2.4	FORMAS DE EROSÃO HÍDRICA TERRESTRE CAUSADOS PELA CHUVA	36
2.2.4.1	Processos erosivos hídricos devido ao impacto da gota da chuva	36
2.2.4.2	Processos erosivos com característica laminar ou de intersulcos	37
2.2.4.3	Processos erosivos hídricos em sulcos	38
2.2.4.4	Voçorocas (ou boçorocas)	38
2.3	BACIA HIDROGRÁFICA COMO ÁREA DE AVALIAÇÃO E ESTUDO CIENTÍFICO	40
2.4	GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE ESPACIAL	12
2.4.1	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	13
2.4.1.1	Componentes de um Sistema de Informação Geográfica	17
2.4.1.2	Sensoriamento remoto	19
2.4.1.3	Modelo de dados utilizado nos SIG	19
2.4.1.4	Modelos de representação do terreno	21
2.5	MODELOS, MÉTODOS E FORMAS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	23
2.5.1	MÉTODOS QUANTITATIVOS E PRINCIPAIS MODELOS	25
2.5.2	PARÂMETROS E INFORMAÇÕES DE ENTRADA PARA APLICAÇÃO DOS MODELOS	31
2.5.3	OS SIG E A METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE CRITÉRIO MÚLTIPLOS	31
2.5.4	O SIG COMO FERRAMENTA DE APOIO NA APLICAÇÃO DOS MODELOS	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	45
3.1.1	VEGETAÇÃO	45
3.1.2	CLIMA	47
FONTE: PRÓPRIO AUTOR.		47
3.1.3	RELEVO E DECLIVIDADE	47
3.1.4	USO E OCUPAÇÃO	49
3.1.5	GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E PEDOLOGIA	52
3.1.6	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA	54
3.1.6	FEIÇÕES EROSIVAS CONHECIDAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO ENGANO	57
3.2	ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À EROSÃO DE ACORDO COM A METODOLOGIA VNE	63

3.2.1 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA VNE EM AMBIENTE SIG	65
3.2.1.1 Geologia	68
3.2.1.2 Solos (pedologia)	69
3.2.1.3 Geomorfologia	70
3.2.1.4 Uso e Ocupação da área	75
3.2.1.5 Clima	75
3.3 ANÁLISE DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DA PERDA DE SOLOS	76
3.3.1 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DA PERDA DE SOLO EM AMBIENTE SIG	78
3.3.1.1 Erodibilidade (Fator K)	81
3.3.1.2 Erosividade (Fator R)	82
3.3.1.3 Fatores topográficos (Fatores L e S)	85
3.3.1.4 Fatores de uso, ocupação e manejo dos solos (Fatores C e P)	89
3.4 ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE DE PROCESSOS EROSIVOS UTILIZANDO METODOLOGIA AHP	91
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1 MAPA DE VULNERABILIDADE SEGUINDO A METODOLOGIA VNE	95
4.1.2 COMPARAÇÃO COM PONTOS DE FEIÇÕES EROSIVAS CONHECIDOS NO LOCAL	98
4.2 APRESENTAÇÃO DOS MAPAS DE ESTIMATIVAS PERDA DE SOLO E CLASSES DE POTENCIAL EROSIVO CONFORME AS DUAS FORMAS DE CÁLCULO DA USLE	100
4.2.1 COMPARAÇÃO COM PONTOS DE FEIÇÕES EROSIVAS CONHECIDOS NO LOCAL – USLE	112
4.3 APRESENTAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE EROSÃO CONFORME O MÉTODO AHP	116
4.4 VISITA À CAMPO PARA CONHECIMENTO DA ÁREA	119
5 CONCLUSÕES	124
REFERÊNCIAS	126
APÊNDICE	137

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma nação depende diretamente da utilização de recursos naturais para o pleno funcionamento e crescimento dos diversos setores que a compõe. As formas e processos de exploração desses recursos se intensificaram ao longo dos anos juntamente com o crescimento econômico e populacional. Um dos agravantes da exploração não controlada dos recursos terrestres é a não aplicação de medidas e técnicas para prevenir a degradação de ambientes frágeis e susceptíveis à ocorrência de processos ambientais negativos. Uma maior aproximação no âmbito preventivo por parte de entidades diretamente relacionadas ao manejo do uso dos recursos naturais poderia propiciar um melhor controle de situações problemáticas e degradantes considerando o meio biótico e abiótico.

Dos recursos naturais presentes nos ecossistemas terrestres, destacam-se a água e o solo, os quais possuem diversos processos físicos e químicos que integram um ao outro e são igualmente passíveis de sofrerem degradação por ações antrópicas. Um dos processos de alteração das características do solo é a erosão, que pode ocorrer tanto de forma natural devido às mudanças climáticas, geológicas e topográficas no decorrer do tempo, ou, ainda, devido às ações humanas, atuando como intensificador de processos erosivos naturais ou mesmo propiciando o aparecimento de novos.

O acelerado crescimento populacional e a falta de controle prévio do uso e ocupação de determinadas áreas são fatores diretamente ligados com a intensificação de processos erosivos aumentando a degradação ambiental de determinado ambiente. A erosão presente em certo local – a princípio – pode não parecer como algo severo, porém antes do processo ser notável já houve a diminuição das qualidades de plantio do solo, devido a redução dos nutrientes levados pelo processo de lixiviação, e, caso nenhuma medida for tomada, o processo irá se agravar trazendo maiores transtornos, sendo entre os principais: redução expressiva da fertilidade local do solo, assoreamento de cursos d'água, diminuição da área útil cultivável, mudanças paisagísticas e comprometimento da infraestrutura rural.

O processo de erosão – mesmo ocorrendo de forma semelhante em diferentes locais do mundo – possui especificidades de cada região, sendo influenciado pelo clima, relevo, topografia e a cobertura vegetal do local estudado. Assim, para uma melhor avaliação local do processo estudado, normalmente adota-se a bacia hidrográfica como unidade natural de estudo, sendo esta definida por Christofolletti (1981) como uma área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial, funcionando como um sistema, em que cada um dos elementos, matérias e energia presentes apresentam uma função própria e estão estruturados e relacionados entre si. Sendo assim, a bacia hidrográfica funciona como uma área base para o estudo e avaliação de alterações que podem ocorrer em âmbitos mais abrangentes, sendo considerada por Andreozzi (2005) como a menor unidade de paisagem capaz de integrar os ambientes terrestres incluindo fatores como vegetação natural, agricultura, solos e água, funcionando como um sistema refletivo de uma unidade maior para a avaliação de ações antrópicas.

A avaliação de um processo erosivo depende de diversos fatores que estão diretamente relacionados com a dinâmica de alteração do ambiente em que se estuda o processo em si. É importante a definição de informações que são obtidas apenas com visitas à campo, assim como outras que demandam um amplo espaço temporal e modelagem matemáticas para a definição e aquisição desses fatores – principalmente relacionados às mudanças climáticas. Sendo assim, a criação de uma metodologia que inclua informações tanto de caráter espacial como temporal propicia a elaboração de possíveis procedimentos para a predição, avaliação e quantificação desses processos erosivos buscando averiguar e avaliar a fragilidade do local estudado.

Com base nisto, são propostas duas formas de avaliação da erosão: a qualitativa e a quantitativa. A aproximação qualitativa foca na forma e grau da erosão enquanto o estudo quantitativo considera mais importante as características que podem ser matematicamente mensuradas, sendo possível, com base em parâmetros de ensaios e estudos, a avaliação do comportamento da erosão por meio de modelos físicos, estatísticos e paramétricos, no qual são determinados com base nas leis da física e química (ALMOROX *et al.*, 2010; NEVES, 2017).

Atualmente, existem diversos modelos de avaliações quantitativas que fazem uso dos mesmos fatores e características enquanto outros utilizam uma abordagem totalmente diferente, sendo cada um direcionado para determinado uso de acordo com a necessidade de avaliação do usuário. Ademais, novos métodos são frequentemente criados ou métodos antigos modificados com o intuito de sempre aprimorar as avaliações dos processos erosivos visando a adequação da metodologia a particularidade do local estudado ou da necessidade da pesquisa.

De acordo com Beskow *et al.* (2009) resultados quantitativos relacionados à taxa da perda de solo e estratégias de conservação não são normalmente criados e disponibilizados para locais com problemas de erosão. Entretanto, avaliações quantitativas se fazem necessárias para a elaboração de estratégias de manutenção desses locais tanto para auxílio em projetos e ações governamentais quanto para a resolução de problemáticas ambientais. Sendo assim, modelos de predição, quantificação e mapeamento de processos erosivos se tornam importantes ferramentas para a criação de diferentes estratégias quanto a tomada de decisões em relação ao uso, ocupação e gestão do solo em uma bacia hidrográfica.

E ainda, é importante ressaltar que os processos erosivos ocorrem de formas específicas em cada região, devido às mudanças dos diversos fatores que alteram a forma como um processo erosivo se comporta. Sendo assim, as condições climáticas, de relevo, natureza e composição do terreno e a cobertura vegetal fazem parte da base do estudo de um processo erosivo.

Com o advento e a popularização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) nas mais diversas áreas de estudo foram também criadas aplicações dessa ferramenta no campo de avaliação de processos erosivos. Muitas das informações necessárias para a elaboração de um estudo relacionado à erosão precisam passar por extensos processos de mapeamento e técnicas de interpolação para posteriormente serem utilizados em determinados modelos. De acordo com Fujaco (2016), muitos dos fatores utilizados em diversos modelos podem ser espacializados e inseridos em um banco de dados geográfico de um programa ou plataforma SIG para que o resultado do estudo conduzido – após o tratamento necessário dos dados - seja representado em uma malha georreferenciada, permitindo, assim, uma análise quantitativa da distribuição espacial da erosão, focando no objetivo do estudo.

Além disso, conforme mencionado por De Roo e Jetten (1999), uma das principais razões em se utilizar SIG para este tipo de estudo é que os processos de erosão variam espacialmente e, assim, uma malha de células georreferenciadas deve ser utilizada para que toda e qualquer variação seja considerada no processo. E, ainda, o mesmo autor ressalta que a quantidade de fatores e dados utilizados para uma precisa avaliação dos processos erosivos pode ser expressivamente grande dificultando a inserção desses dados manualmente em outro tipo de sistema. Por fim, em muitas situações práticas, tomadores de decisões estão mais interessados na distribuição espacial do risco à erosão de determinada área do que com a variação final da perda de solo, portanto, a apresentação de uma imagem georreferenciada com a criação final de um mapa de risco acaba sendo de maior utilidade do que estimativas numéricas apresentadas de forma generalizada e sem espacialização.

A microbacia do Córrego do Engano - área de estudo deste trabalho - localiza-se no município de Nova Canaã Paulista – SP, no extremo Noroeste Paulista, sendo esta região caracterizada por diversos usos agrícolas como a cana de açúcar, pastagem, reflorestamento, pequenos cultivos, entre outros, e possui evidências de processos erosivos locais, conforme informações do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - SigRH (2008). A ausência de estudos com enfoque nas estimativas e avaliações dos processos erosivos nesta região – que é considerada como uma área frágil, facilitando o acontecimento de erosões (MEDEIROS *et al.*, 2016) – juntamente com a importância da criação de políticas de planejamento e racionalização quanto ao uso de terras agrícolas em pequenas bacias e a possibilidade da área fornecer o material necessário para aplicação de diversas aproximações metodológicas torna o presente trabalho relevante para um estudo da qualidade ambiental em relação ao potencial local à ocorrência de erosão.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi gerar um mapeamento de locais com alto potencial de aparecimento de processos erosivos na microbacia do Córrego do Engano utilizando como apoio algumas metodologias de avaliação quantitativa, focando na comparação entre o resultado dos métodos empregados com processos

erosivos em andamento, buscando a criação de mapas de áreas críticas em relação à ocorrência de processos erosivos.

Além disso, permitir a elaboração de uma rotina com o melhor método – ou a combinação de mais de um deles – criando uma forma não complexa para a avaliação do potencial erosivo de determinada área facilitando a reprodução e aplicação da mesma metodologia em outros locais.

Por fim, pretende-se desenvolver uma aplicação técnica que pode ser utilizada como subsídio para a realização de estudos posteriores com o intuito principal de melhorar as condições ambientais locais de determinada bacia com relação a propensão na ocorrência de erosão por meio da criação de mapas, podendo estes serem utilizadas como ferramentas para gestores, órgãos públicos e administradores ambientais na ajuda em tomadas de decisões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos científicos relacionados ao conceito de erosão

2.1.1 Definição

De acordo com Zachar (1982), a palavra erosão tem sua origem no Latim sendo derivada da palavra *erodere*, que significa retirar algo sequencialmente de forma a escavar uma superfície. O termo foi utilizado primeiramente na geologia para descrever a formação de cavidades em encostas devido à ação da água na retirada de material da superfície. Enquanto a remoção superficial de material era chamada de ablação. Além disso, diversos outros termos eram utilizados para descrever processos semelhantes de remoção de material devido à algum tipo de ação, como a corrosão, deflação e abrasão. Atualmente, diversos autores chamam o processo de destruição ou transformação do solo ou da superfície terrestre apenas como erosão para evitar ambiguidades e falsas interpretações.

Erosão pode também ser definida como a remoção da superfície material do solo causada pela ação do vento e da água, sendo impactada por diversos fatores como a declividade do terreno, clima, uso e ocupação inadequada da região, cobertura vegetal e desastres naturais, sendo a atividade humana um grande acelerador dos processos que acarretam a erosão. Este fenômeno antrópico é notoriamente conhecido como um problema severo ao ambiente, uma vez que está associado com práticas agrícolas inadequadas, como a pecuária extensiva em pequenos espaços de terra, mal-uso de áreas florestais e alterações de paisagens para a extração de recursos (CHÁVEZ *et al.*, 2010).

E ainda, de acordo com Julien (1994), a erosão ocorre primeiramente com a remoção de partículas do solo ou rocha devido à algum agente influenciador - seja ele natural ou antrópico - seguido pelo transporte e por fim a deposição dessas partículas que também são chamadas de sedimentos. Esse é um processo natural que tem acontecido desde os primórdios da formação geológica do corpo terrestre, sendo um dos agentes responsáveis pela formação da estrutura atual do planeta. Atualmente, o processo de erosão, principalmente devido à interferência humana, é um grande causador de problemas ambientais. Ainda, de acordo com o mesmo autor, as atividades humanas exercem uma profunda influência nos processos erosivos

aumentando em até 100 vezes a intensidade da ação erosiva sobre alguma área, comparada com a erosão geológica natural.

O processo erosivo ocorre naturalmente na superfície terrestre e está diretamente relacionado com a dinâmica e o movimento dos solos e sua deposição em diferentes locais. A intensidade da movimentação de partículas dos solos é algo que está relacionado com as ações que interferem nos processos de movimentação dessas partículas seja devido à fatores naturais ou antropogênicos. De acordo com Godone e Stanchi (2010) a intensidade da remoção das partículas de solos e rochas é variável e acarreta diferentes impactos ambientais, uma vez que a taxa de formações de solos é consideravelmente mais lenta que os processos de erosão, sugerindo a importância da aplicação de práticas mitigadores para a preservação do solo.

Sendo assim, os processos erosivos podem ocorrer naturalmente ou devido à influência de ações humanas. A primeira é conhecida como erosão geológica, onde o processo ocorre lentamente juntamente com a formação e transformação dos solos e rochas, e o segundo ocorrendo de forma acelerada devido às mudanças exercidas pelas transformações e ações humanas no local.

A erosão natural ocorre lentamente em um extenso período em um ambiente em equilíbrio e controlado por fatores naturais, sendo este tipo de erosão um dos fatores responsáveis pela formação dos solos e sua distribuição na superfície terrestre. O resultado é a formação de diversas paisagens como os cânions, vales, fiordes entre outros, devido à ação da água, vento, gravidade e temperatura. Quando a erosão natural sofre a interferência externa de algum fator climático, ambiental ou geológica ela pode ter sua velocidade de ocorrência e intensidade aceleradas aumentando a quantidade de partículas removidas no processo em um curto espaço de tempo, ocorrendo o processo de forma mais rápida do que a capacidade de restauração do solo. Sendo assim, ação antrópica é uma forma de interferência humana no ambiente podendo provocar a aceleração de uma erosão enquanto forças extremas sazonais – avalanches, secas, inundações – são aceleradores naturais (BENNETT, 1928, apud. ZACHAR, 1982).

Uma das características intrínsecas de um solo é a sua susceptibilidade ou probabilidade em sofrer processos erosivos – conhecido, também, como a

erodibilidade de um solo – sendo esta diretamente relacionado com a resistência do solo aos processos que acarretam a erosão. De acordo com Julien (1994) a erodibilidade natural dos solos pode ser aumentada devido a ações humanas relacionados à agricultura e a pecuária. Além disso, pode ocorrer ainda a remoção superior da camada protetora dos solos, intensificando ainda mais os problemas derivados de um processo erosivo que vão desde a diminuição da produtividade dos solos até a deformação das características do leito de algum rio ocasionado pela sedimentação. Por exemplo, a erosão causada pela ação do ciclo hidrológico terrestre, de acordo com Beskow *et al.* (2009), é um dos processos de degradação ambiental mais significativos ocasionando, em locais onde o processo encontra-se em estágio avançado, a redução da fertilidade dos solos e a o assoreamento de corpos de água.

Além das características de susceptibilidade à erosão, ou erodibilidade, do solo, é possível citar outros fatores influenciadores na intensidade e velocidade dos processos erosivos, sendo estes: o ciclo hidrológico (com enfoque na chuva); a topografia e relevo; as propriedades físico-químicas do solo e a cobertura vegetal do local. E, conforme citado anteriormente, os intensificadores antrópicos e naturais. Há, ainda, um novo fator que é adicionado como um importante modificador da intensidade ou velocidade de um processo erosivo, funcionando como uma medida remediadora sendo chamado de práticas de conservação do solo (RENARD *et al.*, 1997).

De acordo com a explicação dada por Barrow (1991) a chuva está diretamente ligada com a erosividade de um solo, ou seja, sua capacidade em causar danos ao mesmo; as propriedades físico-químicas do solo diretamente afetam as características de erodibilidade aumentando ou não a fragilidade quanto ao aparecimento de processos erosivos; o relevo está relacionado com a declividade e assim com a magnitude de um declive (tamanho, forma e comprimento) influenciando diretamente na velocidade de transporte de sedimentos e a cobertura vegetal influencia principalmente na proteção do terreno.

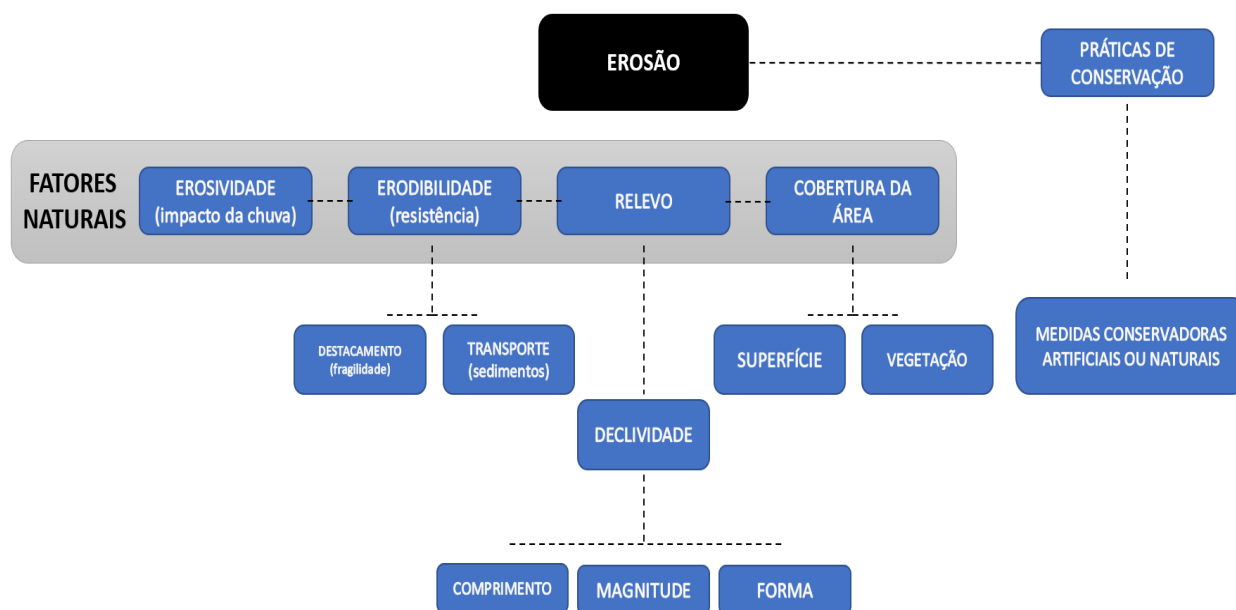
2.1.2 Fatores condicionantes na formação dos processos erosivos

O estudo dos processos erosivos causados pela chuva depende do entendimento de dois eventos iniciais relacionados com a dinâmica do efeito hídrico sobre o terreno. Primeiramente, ocorre o impacto da água sobre o solo, que caem com velocidade e energia variáveis, sobretudo quando este está desprotegido de qualquer cobertura vegetal, promovendo assim o desprendimento e a liberação de suas partículas. Em seguida, ocorre o escoamento da água com o transporte dessas partículas, com o volume e a velocidade da enxurrada variando de acordo com a intensidade, declividade e comprimento do declive do terreno. Sendo assim, a forma de escoamento atuante interfere diretamente nas características do tipo de erosão hídrica presente.

No primeiro evento – ação da água sobre o solo – os fatores como erosividade, erodibilidade, cobertura vegetal e práticas de conservação são os que diretamente interferem na forma como o impacto inicial da erosão irá ocorrer. No segundo evento – transporte das partículas sobre o solo - o relevo, topografia e cobertura da área são os mais importantes com a erodibilidade e práticas de conservação em segundo plano.

Conforme Figura 1, todos esses fatores interligados fazem parte de todo o processo, sendo que os fatores naturais (erosividade, erodibilidade, relevo, cobertura da área) podem ser alterados por fatores externos extremos ou por ações humanas afetando diretamente a forma de ocorrência dos processos erosivos.

Figura 1 - Fatores relacionados com a ocorrência ou não de erosão



Fonte: Adaptado de Barrow (1991)

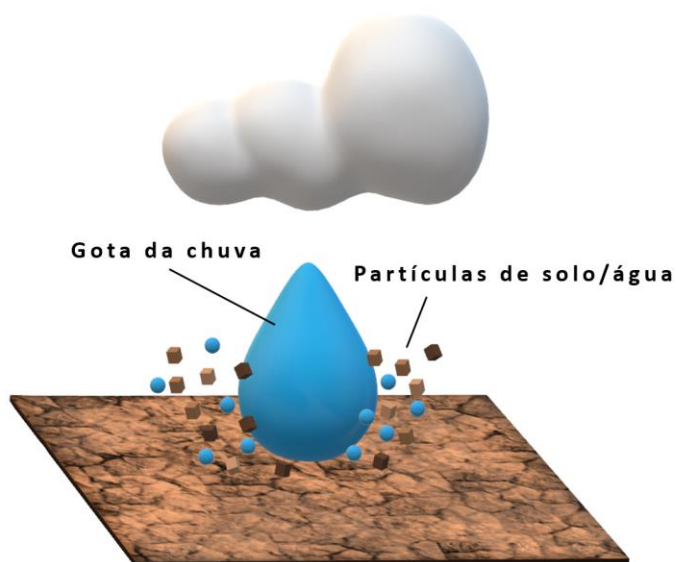
2.1.2.1 Impacto da chuva e a influência na erosividade

A água da chuva provoca a erosão por meio do impacto das gotas uma vez que mesmo contendo uma pequena massa chega ao solo com uma energia considerável, devido a velocidade final no momento do impacto, e a quantidade de gotas que chegam ao mesmo local em um curto espaço de tempo. Após o impacto, ocorre o escoamento da enxurrada carreando as partículas soltas durante o impacto (Figura 2). O volume e a velocidade da enxurrada dependem da intensidade, duração e frequência da chuva, sendo a intensidade a informação pluviométrica mais importante para o estudo dos processos erosivos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

A ação erosiva da chuva depende da distribuição pluviométrica, sendo ela regular ou não, na área de estudo, assim como da intensidade da precipitação. Chuvas torrenciais ou mesmo pancadas intensas de chuva (que consiste em grande volume em um curto espaço de tempo) constituem a forma mais agressiva de contato da água no solo, sendo a velocidade e a intensidade do processo erosivo máximos durante e após esse período de chuvas intensas (SALOMÃO *et al.*, 1999). Dessa

forma, chuvas que tendem a concentrar-se em um local durante um curto espaço de tempo trazem maiores danos para área de incidência, sendo assim, regiões que possuem características de períodos chuvosos intensos, durante o verão, sofrem maiores danos por processos erosivos do que regiões com o mesmo volume de chuva, porém espaçados durante todo o ano.

Figura 2 - Impacto da gota de chuva no solo



EFEITOS:

- Desprendimento de partículas do solo no momento do impacto devido à turbulência causada pela energia imprimida no local e
- Transporte, por salpicamento, das partículas desprendidas.

Fonte: Próprio autor.

A duração da chuva em combinação com o volume cria a intensidade da precipitação. Quando inicia uma chuva de intensidade uniforme, a água se infiltra por um período mais ou menos longo, dependendo das condições de umidade do solo e da sua intensidade. Posteriormente, começa a enxurrada, que aumenta de volume em proporções cada vez menores até alcançar uma quantidade estável para depois retornar à situação inicial.

Zachar (1982) demonstra pela Tabela 1 que a intensidade da precipitação é o fator governante na quantidade de solo perdido pelo carreamento de sedimentos e não o número de chuvas com aquela intensidade que ocorreram no local. Isso ocorre devido à capacidade de infiltração do solo, onde em chuvas de menor intensidade o solo é capaz de absorver a maior parte da água.

Tabela 1 – Efeito da intensidade da precipitação sobre a perda de solo

Intensidade da precipitação (mm/h)	Número de precipitações	Perda do solo (t/ha)
0 – 25.40	40	3.75
25.40 – 50.80	61	5.95
50.80 – 76.20	40	11.72
76.20 – 101.60	19	11.44
101.60 – 127.00	13	34.24
127.00 – 152.40	4	36.32
152.40 – 177.80	5	38.72
228.60 – 254.00	1	47.93

Fonte: Zachar (1982)

Portanto, o conhecimento da intensidade e distribuição da precipitação ao longo do ano é um critério significativo para definir condições mais ou menos favoráveis ao desenvolvimento de processos erosivos, sendo importante também considerar as condições climáticas gerais e o balanço hídrico entre os períodos de seca e cheia. Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), dados de chuva em totais ou médias mensais e anuais pouco significam em relação a erosão, uma vez que em duas regiões distintas pode cair o mesmo volume de chuva não significando que o mesmo processo erosivo irá ocorrer de maneira semelhante nos dois locais, sendo que o local com maior incidência de chuvas pesadas pode-se esperar uma erosão mais severa.

De acordo com Wischmeier e Smith (1978), o índice que expressa a capacidade da chuva de provocar erosão é conhecido como erosividade. Para a definição desse fator supõe-se que todos os outros são mantidos constantes, sendo a erosividade proporcional ao produto da energia cinética total das gotas de chuva em determinado local e a sua intensidade máxima em um período de 30 minutos. Essa relação é considerada como a melhor forma para determinar o potencial erosivo de chuva em determinado local (MOHAMADI e KAVIAN, 2015).

2.1.2.2 Relevô e suas implicações nos processos erosivos

De acordo com Zachar (1982) o relevô de um terreno é de fundamental importância para o estudo e avaliação dos processos erosivos. Entre as características de um relevô, deve-se considerar principalmente a declividade a qual determina o seu grau de inclinação, comprimento, forma e aspecto. Em geral, o tamanho e a quantidade de material em suspensão que é arrastado pela água

dependem da velocidade com que ela escorre, sendo essa velocidade uma resultante direta da influência do comprimento do lançante e do grau de declive do terreno que pode ser separado em classes conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição das classes de declividades

Classes	Declividade (%)	Relevo
I	0 – 2	Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento
II	2 – 5	Terrenos com declividades suaves nos quais o escoamento superficial é lento ou médio e os problemas de erosão requerem práticas simples de conservação
III	5 – 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial
IV	10 – 15	Terrenos muito inclinados onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam problemas de erosão superficial, exceto quando ocorrem em solos permeáveis e poucos arenosos
V	15 – 20	Terrenos inclinados onde o escoamento superficial é rápido, com problemas de erosão superficial
VI	20 - 25	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido, susceptível à ocorrência de processos erosivos
VII	25 – 50	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com desenvolvimento de solo raso a muito raso. Susceptível à ocorrência de processos erosivos, sujeitos a movimentos de massa e queda de blocos
VIII	>50	Terrenos muito íngremes ou escarpados, com desenvolvimento de solos muito rasos, com exposição da rocha, extremamente susceptível à erosão

Fonte: Adaptado de Gomes (2002)

Conforme a declividade acentua-se, o coeficiente de escoamento da água que não infiltrou no solo aumenta (“runoff”). Dessa forma a energia cinética e a capacidade de carreamento de partículas pela água também aumenta, diminuindo a capacidade de resistência do solo e assim sua estabilidade, propiciando o desprendimento de partículas. Logo, a possibilidade de ocorrência de erosão intensifica-se com o aumento da declividade de um terreno.

O comprimento e o grau de confluência da rampa ou encosta são importantes principalmente em consideração ao aumento do fluxo de água ao longo do percurso.

Juntamente com a mudança no fluxo de água e no grau de confluência ocorrem também alterações na velocidade e na capacidade de transporte da água. De maneira geral, quanto maior este comprimento maior a aceleração do escoamento superficial em direção a base da encosta devido ao acúmulo de enxurrada gerando maior energia tendo como resultado uma erosão maior.

Uma relação importante entre o relevo e a formação de processos erosivos são os tipos de uso do solo para cada classe de declividade. De acordo com Cunha e Guerra (1998), cada percentual de classe de declividade deve ser utilizado para um tipo específico de cultura com o intuito de reduzir a probabilidade de ocorrência de processos erosivos devido ao mau uso do terreno em relação a declividade. A Tabela 3 a seguir apresenta o uso adequado do solo em relação a classe de declividade.

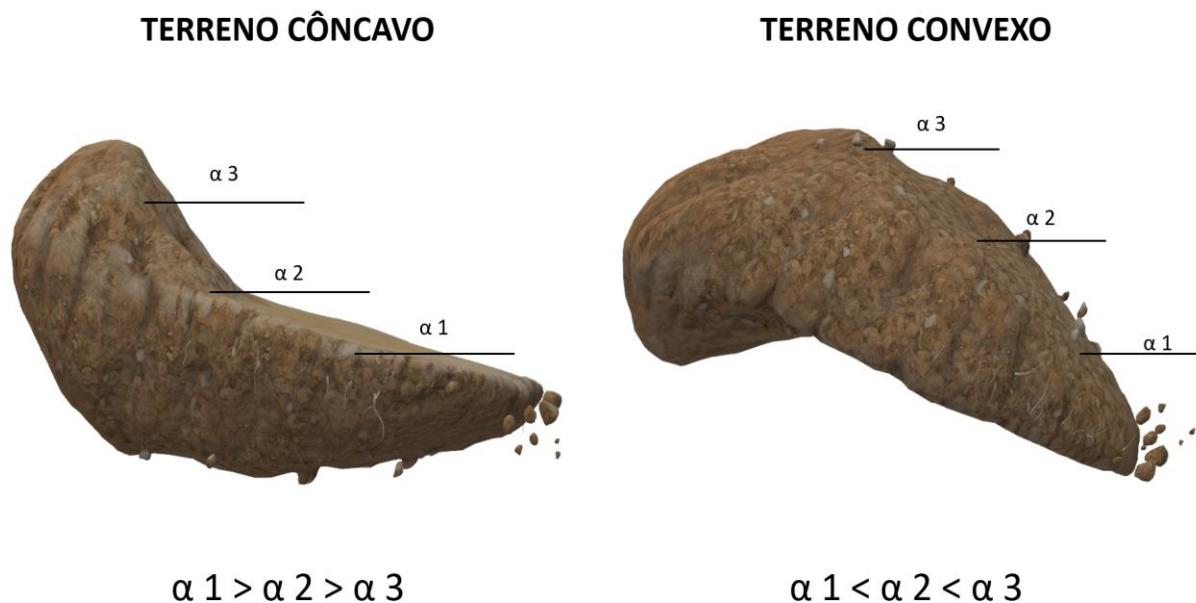
Tabela 3 - Tipos de uso indicado para diversos intervalos de classe de declive

Intervalos de classe de declividade		Tipo de Uso do Solo (indicação)
Percentual	Graus	
<1	<1	Agricultura sem restrições
1 a 6	1 a 3	Medidas de conservação ligeiras Agricultura intensiva
6 a 12	3 a 7	Agricultura com práticas moderadas conservacionistas
12 a 20	7 a 12	Agricultura com rotação limite do trator Conservação intensa
20 a 45	12 a 24	Culturas permanentes com restrições
>45	>45	Área de preservação obrigatória por lei

Fonte: Cunha e Guerra (1998) e Brasil (2012).

Outro aspecto que deve ser considerado na topografia do terreno é a forma do declive: que pode ser côncavo, convexa, homogêneo ou deformado. De acordo com Sena (2008), as topografias predominantemente convexas apresentam dois fatores propícios à aceleração do escoamento, sendo o crescimento das declividades locais em direção à base e a tendência da concentração de fluxos em determinados pontos e direções. As formas côncavas tendem a apresentar características contrárias com crescimento de declividades dispersos – assim como o terreno deformado – e redução de valores de declividade próximo à base (Figura 3).

Figura 3 - Forma do declive: côncavo e convexa



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, as variáveis do relevo que interferem diretamente no escoamento e no fluxo de água estão relacionadas com a forma do relevo, declividade e comprimento. Grande parte das informações necessárias sobre estes atributos são obtidas a partir de cartas de declividade, orientação e curvatura produzidas com uma base cartográfica pré-existente separando cada classe conforme a necessidade de estudo. De acordo com Barbosa *et al.* (2012) a medição manual de declividade sobre mapas com curvas de nível é um trabalho cansativo e que demanda um grande tempo e atenção do executor, sendo passível de erros. Atualmente, existem recursos cartográficos, como a utilização de modelos digitais de elevação, que facilitam a criação dessas cartas para aplicação em diversos métodos de análises geoespaciais.

A utilização de modelos digitais de elevação recai principalmente sobre a obtenção de variáveis derivadas da altimetria (declividade). A obtenção destas variáveis é feita com operações de vizinhança (declividade, orientação e curvatura) e, em alguns casos, funções de conectividade (comprimento de rampa e área de captação), que requerem perceptibilidade das feições de interesse (conforme o resultado pretendido) (VALERIANO, 2004).

2.1.2.3 Cobertura da área

A cobertura natural ou artificial de um terreno ou da área em estudo influencia diretamente a forma de ocorrência de um processo erosivo. Por exemplo, para Salomão *et al.*, 1999, a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra à erosão uma vez que quando a chuva cai sobre um terreno coberto com densa vegetação, a gota de chuva divide-se em inúmeras gotículas diminuindo assim a sua força de impacto e por conseguinte os danos ao solo, enquanto em um terreno descoberto ocorre todo o fenômeno de degaste que a precipitação provoca no solo nu, desprendendo as partículas que são facilmente carregadas pela enxurrada.

Em síntese, Bertoni e Lombardi Neto (1999), destacam os seguintes efeitos da cobertura vegetal sobre o solo: (a) proteção contra o impacto direto das gotas de chuvas; (b) dispersão e quebra da energia das águas de escoamento superficial; (c) aumento da infiltração pela produção de poros no solo por ação das raízes; (d) aumento da capacidade de retenção de água pela estruturação do solo por efeito da produção e incorporação de matéria orgânica.

De acordo com Zachar (1982), onde a formação vegetal possui condições favoráveis para a contínua formação de uma cobertura com vegetação nativa, o acontecimento de processos erosivos encontra-se abaixo do esperado. Enquanto em locais com condições menos favoráveis para a formação de cobertura natural de vegetação, a proteção pode ser rapidamente perdida com uma pequena interferência humana ao ambiente.

O mesmo pode ser considerado para proteção do solo devido às culturas perenes e sazonais e outras plantações. Isso se deve ao fato de que o solo está protegido apenas durante um pequeno período do crescimento da vida útil da vegetação, sendo que na maior parte do tempo está parcialmente ou completamente exposto. Dessa forma, o crescimento de uma planta fornece diferentes graus de proteção ao solo e essa proteção varia entre as diferentes espécies utilizadas no plantio. Em relação ao aproveitamento agropecuário, as ocupações por reflorestamento, culturas semipermanentes e pastagem são mais benéficas para a conservação do solo que as culturas anuais as quais expõem frequentemente o solo à ação da água da chuva (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999). Sendo assim, de

acordo com o tipo de cobertura, Ross (1994) estabeleceu diversos graus de proteção, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Graus de proteção por tipos de cobertura vegetal

Graus de Proteção	Tipos de Cobertura Vegetal
Muito alta	Florestas/matias naturais; Florestas cultivadas com biodiversidade.
Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso; Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa); Mata homogênea de Pinus densa; Pastagens cultivadas sem pisoteio de gado; Cultivo de ciclo longo como o cacau
Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível/terraceamento como o café; Laranja com forrageiras entre ruas; Pastagens com baixo pisoteio; Silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas
Baixa	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja) com solo exposto entre ruas; Culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento
Muito baixa / nulo	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto ao longo de caminhos e estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas.

Fonte: Ross (1994)

Dessa forma, Nishyama (1995), afirma que com a remoção da vegetação nativa para o posterior plantio de outro tipo de vegetação a eficiência de proteção e prevenção contra o aparecimento de processos erosivos é perdido, sendo este um dos exemplos em que a interferência humana no ambiente pode causar prejuízos ao sistema.

Outro aspecto a se considerar com relação a cobertura sobre o solo são processos artificiais impostos pelo homem, seja por meio de infraestrutura de construção ou medidas de contenção a erosão. A urbanização de uma cidade é um exemplo da forma como a cobertura do solo é drasticamente mudada pela ação humana, e caso não seja seguido as diretrizes e normas corretas para a elaboração de obras hidráulicas e geotécnicas de contenção, a urbanização não planejada de uma cidade certamente trará transtornos com relação ao aparecimento de diversos pontos com problemas erosivos urbanos. Por outro lado, existem as interferências na cobertura do solo com foco na proteção do ambiente contra processos erosivos, que devem ser feitos seguindo as conformidades do local. Por exemplo, as curvas de níveis, caixas de proteção, diques, entre outros, em áreas agrícolas.

2.1.2.4 Solos e a erodibilidade

O solo, por influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, conferindo maior ou menor resistência, constitui o principal fator natural relacionado à erosão. Sua influência deve-se às suas propriedades físicas, principalmente textura, estrutura, permeabilidade e densidade, assim como suas propriedades química, biológicas e mineralógicas. A Tabela 5 a seguir ressalta as principais características de propriedade consideradas na influência do solo sobre o acontecimento de processos erosivos.

Tabela 5 - Propriedades do solo que afetam os processos erosivos

Propriedades	Características
Textura	- Diretamente relacionada com o tamanho das partículas e influi na capacidade de absorção e de infiltração da água; - Interfere na relação de coesão entre as partículas alterando o escoamento superficial
Estrutura	- Modo de estruturação das partículas, influenciando na capacidade infiltração e absorção; - Solos com estrutura granular favorecem a permeabilidade e a infiltração de águas da chuva, enquanto solos coesos possuem uma menor permeabilidade tendo o efeito contrário;
Permeabilidade	- Determina a maior ou menor capacidade de infiltração da água, sendo influenciada pela porosidade do solo; - Solos arenosos são mais permeáveis que solos argilosos' - Pode sofrer alterações devido a estruturação dos poros.
Densidade	Está relacionado com a massa total e o volume, sendo que solos compactados – logo com maior densidade – tendem a diminuir sua quantidade de poros diminuindo sua permeabilidade e aumentado a erodibilidade.
Físico-químicas e mineralógicas	Influem no estado de agregação entre as partículas aumentando ou diminuindo a erodibilidade.
Matéria Orgânica	- Permite ao solo maior coesão e agregação entre as partículas, tornado o solo mais estável frente a presença de água; - Confere maior poder de retenção de água.
Espessura	- Solos rasos permitem rápida saturação, mesmo que permeáveis; - Interferem na formação de enxurradas devido aos diferentes níveis de gradientes.

Fonte: Adaptado de Salomão *et al.* (1999).

Com relação aos solos, para o acontecimento de processos erosivos, as propriedades mais importantes são a permeabilidade e a resistência (ZACHAR,

1982). A permeabilidade está diretamente relacionada com a taxa de escoamento superficial e a resistência com o desprendimento de partícula devido ao contato da água com o solo. Em solos altamente permeáveis a precipitação é rapidamente absorvida e o solo é afetado apenas pela erosão superficial devido ao levantamento de partículas pela chuva e levemente pela erosão laminar. Enquanto isso, em solos pouco permeáveis ocorre o contrário com grande incidência de erosão superficial laminar.

Todas essas características dos solos, quando analisadas em conjunto, determinam a sua maior ou menor capacidade de propiciar processos de erosão, sendo este chamado de erodibilidade. De acordo com Vilar e Prandi (1993), a erodibilidade indica a maior ou menor aptidão das partículas resistirem aos esforços causados pelos agentes condicionantes dos processos erosivos e está diretamente relacionado com a resistência do solo ao desagregamento de partículas. Ross (1994) classificou alguns solos brasileiros de acordo com sua fragilidade, ligada à erodibilidade, conforme Tabela 6, indicando quais solos devem receber maior atenção quanto ao uso pelo homem.

Tabela 6 - Classes de fragilidade do solo

Classe de Fragilidade	Tipos de Solos
Muito Baixa	Latossolo, Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo textura argilosa
Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo textura média/argilosa
Média	Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolos Vermelho Amarelo textura média/argilosa
Forte	Argissolos Vermelho-Amarelo textura média/arenosa e Cambiosolos
Muito Forte	Argissolos com cascalhos, Neossolos e Areias Quartzênicas

Fonte: Adaptado de Ross (1994)

No início das pesquisas em campo referente ao estudo de processos erosivos, pouco se sabia sobre a erodibilidade do solo, apenas que cada tipo de solo possuía esta característica e estava diretamente relacionado com a sua resistência frente aos processos erosivos. Bennett e Chaplini (1928) foram os primeiros pesquisadores a notar que os solos mais resistentes possuíam uma boa estrutura e eram facilmente

permeáveis, constituindo de pequenos horizontes mecanicamente homogêneos (BENNETT; CHAPLINE, 1928, apud ZACHAR, 1982).

Em seguida, Middleton (1930), estabeleceu que a erodibilidade depende de diversos fatores que são importantes propriedades do solo, sendo eles: (1) estrutura mecânica; (2) componentes coloidais; (3) teor de humidade; (4) densidade do solo; (5) capilaridade; (6) plasticidade; (7) capacidade de inchamento - empolamento; (8) capacidade de redução – contração - e (9) taxa de dispersão. Ficou definido que os solos mais resistentes à erosão possuem uma grande quantidade de partículas de argila, alta quantidade de componentes coloidais para um teor de humidade constante, elevado peso específico em cada fase do solo, limite de plasticidade baixo e pequena quantidade de poeira.

2.1.2.5 Ações antrópicas

Diversos autores, entre eles Zachar (1982), Barrow (1991), Medeiros (2016), concordam que a ação humana (ou de outros seres vivos sob influência antrópica, como na pecuária) influencia diretamente tanto na aceleração dos processos erosivos quanto intensificando os processos naturais. As ações humanas atuam principalmente na destruição da cobertura vegetal natural, na exposição do solo durante os ciclos de plantio e colheita, nas práticas inadequadas de proteção, nas obras mal executadas que acabam concentrando o escoamento em locais frágeis, nas queimadas irregulares e na pecuária com o extenso uso do solo devido ao pastoreio.

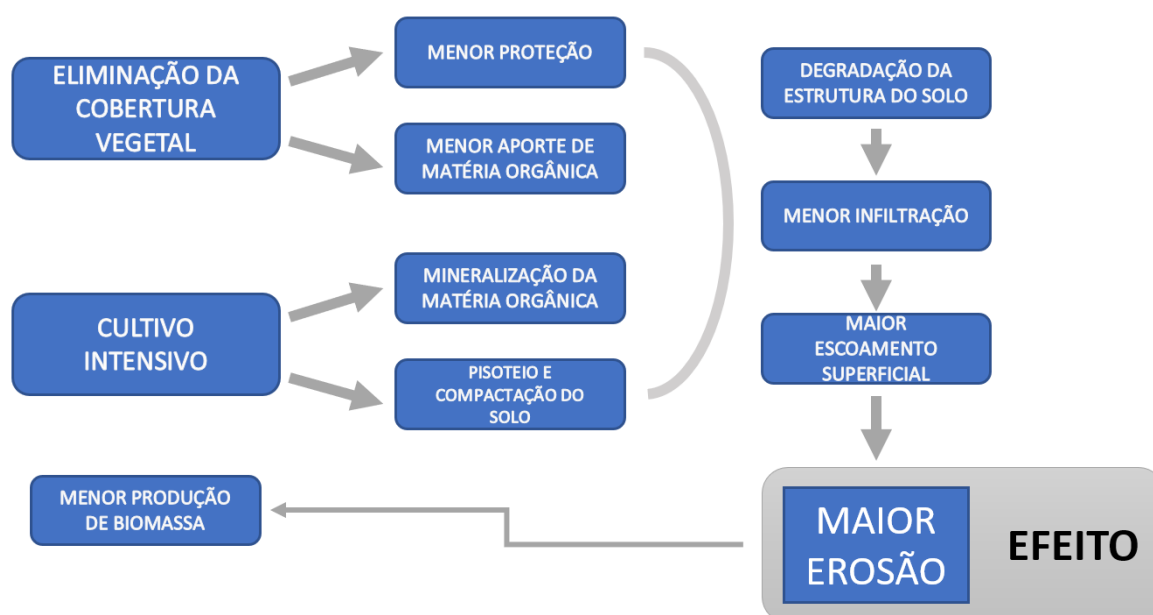
Importante ressaltar que a ação antrópica não é considerada um tipo independente causador de erosão, uma vez que a ação humana é responsável pela aceleração dos processos naturais, atuando diretamente na modificação da erodibilidade, erosividade, cobertura vegetal e características físico-químicas de um solo.

Com relação ao clima, mudanças na cobertura vegetal, grandes obras de engenharia e desflorestamentos podem influenciar nas mudanças do regime hídrico regional ou local interferindo diretamente nas características da erosividade da chuva devido à alteração na sua intensidade.

A topografia sofre alterações principalmente regionais ou locais devido às mudanças na forma do relevo com alterações causadas por obras geotécnicas e de preparo do solo, onde as características topográficas naturais são alteradas para atender as necessidades de projeto, que muitas vezes é mal executada não atendendo as recomendações construtivas e normas.

A cobertura vegetal é o fator que pode ser facilmente alterado pela ação humana ocorrendo de forma localizada – como as mudanças sazonais de uma cultura em um pequeno sítio – ou mesmo em grandes proporções – como os desflorestamentos que acabam por mudar as características de grandes áreas. A Figura 4 a seguir exemplifica as etapas do processo.

Figura 4 - Atividades humanas e implicações no processo de degradação das terras.



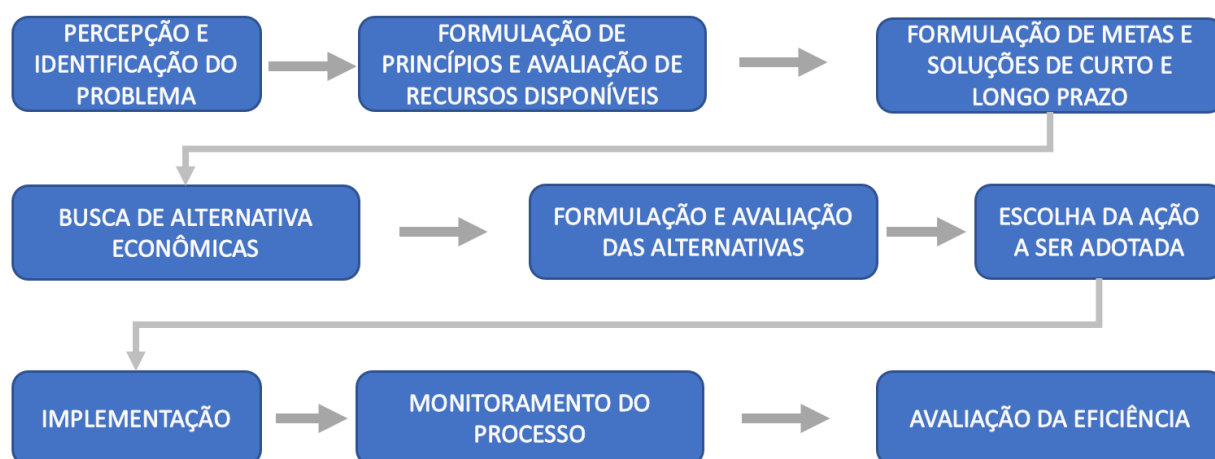
Fonte: Adaptado de Mafra (1999)

O solo tem sua estrutura e composição físico-química facilmente alterada pela agricultura com mudanças bruscas em grandes áreas com a redução da quantidade de matéria orgânica, redução de nutrientes e poluição do solo, sendo todos esses fatores influenciadores na aceleração de processos erosivo.

De acordo com Barrow (1991), a ação antrópica não é unicamente negativa com relação ao desencadeamento da erosão, uma vez que, quando bem executados, é possível aplicar medidas preventivas (ou compensadores) para tentar diminuir os processos erosivos naturais. O primeiro passo é identificar o problema no local onde

é necessário à aplicação de práticas de conservação, em seguida identificar o melhor uso para aquele solo, aplicar a correção necessária para o tipo de uso identificado (seja pela correção da estrutura ou mesmo a plantação de vegetal natural) e manter adequadamente a correção aplicada. A Figura 5 apresenta um diagrama com a sugestão de um processo de gestão para auxiliar no processo de recuperação de áreas degradadas por processos erosivos. Por exemplo, as principais medidas para diminuir a erosão devido à ação da água são: redução do efeito de dispersão e desprendimento das partículas devido ao contato da gota da chuva com o solo; redução da temperatura do solo; melhorar a infiltração e melhorar a matéria orgânica presente no solo.

Figura 5 - Etapa do processo de gestão ambiental com relação ao controle de processos erosivos.



Fonte: Adaptado de Sampaio (2014)

2.2 Tipos de erosão

De acordo com Zachar (1982), os agentes erosivos incluem a água, gelo, neve, vento, detritos, plantas, animais e o homem sendo estes agentes influenciados por diversos fatores naturais. A Tabela 7 a seguir indica os principais tipos de erosão de acordo com os seus agentes causadores.

Tabela 7 - Tipos de erosão e agentes causadores.

Agente		Tipo de erosão	
Fluídos	Vento		Eólica
	Água	Chuva	Impacto das gotas no solo
		Escoamento	Sulcos
			Ravinas
			Voçorocas
			Canais fluviais
		Subsuperficial	Condutos subterrâneos
Gravidade	Movimento de massa	Oceano	Costeira
		Glacial	
			Avalanche Escorregamento Solifluxão Rastejo

Fonte: Adaptado de Pons (2006)

A seguir serão apresentados os tipos de erosão na ordem do menos importante para o mais importante em relação ao enfoque de estudo deste trabalho.

2.2.1 Erosão glacial

É predominante em regiões geladas onde a temperatura constantemente está abaixo de 0 graus Celsius. Uma característica intrínseca deste processo é o movimento lento de grande quantidade de gelo, sendo a cobertura vegetal pouco relevante para proteção devido a grande massa e energia que ocorre no processo. A erosão é predominantemente vista em bordas e encostas de montanhas uma vez que a energia é dissipada pelas camadas de rocha. Há também a formação de grandes fluxos de águas após o derretimento de geleiras com a formação de canais e assim agravando os processos de erosão (ZACHAR, 1982).

2.2.2 Erosão eólica

Esse tipo de erosão é predominante em locais com poucas chuvas e altas temperaturas, sendo a vegetação de grande importância para diminuir os processos erosivos devido ao vento. O processo consiste na desagregação e remoção das

partículas do solo e rocha que podem ser movimentadas entrando em estado de suspensão. Há também a predominância da condição de abrasão onde ocorre o atrito do vento – contendo pequenas partículas sólidas – com alguma superfície, desgastando-a (ZACHAR, 1982; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

2.2.3 Erosão hídrica

A erosão hídrica engloba os processos de destruição da superfície terrestre devido à ação do impacto das gotas de chuvas e movimentos de águas fluviais, subterrâneas e marítimas. Dessa forma é possível dividir a erosão hídrica em dois grandes grupos: erosão hídrica marítima e erosão hídrica terrestre.

A erosão hídrica marítima é de grande importância para regiões costeiras onde há a predominância do contato da água do mar com regiões não protegidas das encostas marítimas. A erosão hídrica terrestre ocorre de diversas formas direto sobre o solo ou em canais subterrâneos devido a ação de chuva e rios.

Em países tropicais os processos físicos e químicos do ambiente ocorrem sobre forte influência do clima, principalmente devido à precipitação, ocasionando diversas transformações e alterações no ecossistema. A erosão causada pela água da chuva ocorre devido aos índices pluviométricos elevados, que se concentram em determinadas épocas do ano causando chuvas de alta intensidade agravando os problemas causados pela erosão hídrica (NEVES, 2017).

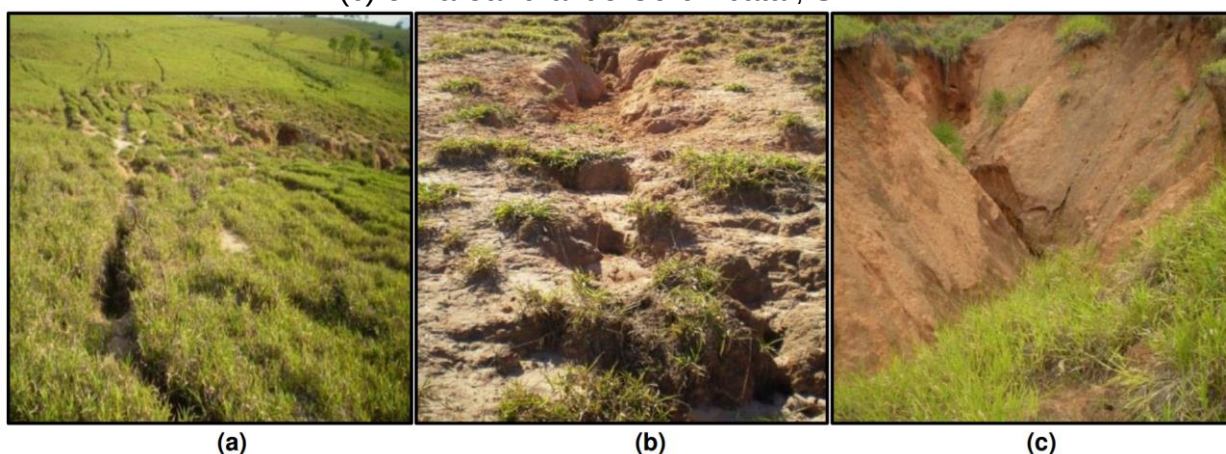
O principal fator na erosão hídrica ocasionado pela chuva é devido ao movimento horizontal e vertical da água. Chuva afeta o solo desde o impacto até o escoamento superficial e subsuperficial. Tempestades trazem o maior problema para o solo devido à grande intensidade de chuva em um curto espaço de tempo. De acordo com Salomão (1999), dependendo da forma em que se dá o escoamento superficial ao longo da vertente, podem-se desenvolver dois tipos de erosão: erosão laminar ou em lençol, quando causada por escoamento difuso das águas de chuva, resultando na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo, e erosão em sulcos, quando causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir para ravinas.

2.2.4 Formas de erosão hídrica terrestre causados pela chuva

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), a erosão causada pelo impacto da água da chuva e posterior escoamento pode ocorrer de diferentes formas e ao mesmo tempo, sendo elas de forma laminar, em sulcos ou boçorocas.

Esta classificação refere-se aos estágios de forma sequencial em que ocorrem e concentram-se na forma de enxurrada na superfície do solo. A erosão laminar é a lavagem da superfície do solo, seguido pela concentração da enxurrada em sulcos (pequenos canais) e finalmente a formação de boçorocas com o aumento gradativo dos sulcos até tamanhos expressivos em largura e profundidade. A Figura 6 apresenta uma foto real das principais formações de erosão em Corumbataí, São Paulo, como forma de ilustração dos processos.

Figura 6 - Erosão por sulco (a), erosão por sulcos profundos - ravinas (b) e voçoroca (c) em área rural de Corumbataí, SP.



Fonte: Michette (2015)

2.2.4.1 Processos erosivos hídricos devido ao impacto da gota da chuva

Os danos causados pelas gotas da chuva no solo devido à grande força de impacto são responsáveis pelo primeiro processo de erosão no solo. O desprendimento das partículas devido ao impacto da gota da chuva causa diretamente a perda da capacidade de infiltração do solo que irá causar o acúmulo de água em certos pontos formando posteriormente a enxurrada.

De acordo com Zachar (1982), as características físicas da própria chuva são os principais fatores a serem considerados com relação à capacidade erosiva devido

ao impacto da chuva no solo. Deve-se considerar a taxa e a duração da chuva, a velocidade da queda dos pingos e sua direção, o potencial elétrico da atmosfera, flutuações do padrão da chuva e seu tempo de recorrência. Pode ser resumido que o efeito erosivo do primeiro contato da chuva com o solo depende basicamente da força cinética.

2.2.4.2 Processos erosivos com característica laminar ou de intersulcos

De acordo com Lal (1990), a ação da chuva ocorre em duas etapas, sendo a primeira o destacamento das partículas seguido pelo transporte. As partículas destacadas são transportadas pelo deslocamento causado pelo impacto físico e pelo carreamento de partículas realizado pelo escoamento superficial. Se este escoamento possuir característica de não ser concentrado então é chamado de laminar.

A erosão laminar está relacionada com o processo de escoamento superficial que ocorre de forma dispersa, sendo de profundidade variada e com ausência de canais definidos. Este escoamento está relacionado com a ocorrência de chuvas prolongadas uma vez que movimento superficial das águas se inicia após atingido a capacidade de infiltração do solo (NEVES, 2017).

Esta forma de erosão hídrica é a menos notável e por isso de extrema importância, uma vez que o solo pode estar já debilitado quando os primeiros sinais visíveis começam a aparecer. Com a frequência de chuvas no local, continua ocorrendo o desprendimento de partículas da superfície devido às forças horizontais que atuam na direção do fluxo da enxurrada, sendo um ciclo repetitivo e cumulativo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

A perda de solo devido à erosão laminar pode ser avaliada e quantificada por meio da metodologia proposta por Wischmeier e Smith em 1978 sendo de extenso conhecimento acadêmico e aplicado corriqueiramente no campo da engenharia e agricultura. O método é conhecido como Equação Universal de Perda de Solo – EUPS que busca mensurar a perda de solo a partir de fatores característicos e responsáveis pelos processos erosivos. O resultado é uma multiplicação que fornece o valor de solo perdido para determinada área na fração toneladas por hectares por ano.

Os principais fatores relevantes para o cálculo são: clima (R), solo (K), relevo (LS), uso, manejo e práticas de conservação ou remediação (CP), que juntamente determinam a perda de solo na região fornecendo meios para prever processos erosivos em determinada região, assim como indicar áreas suscetíveis a processos erosivos.

2.2.4.3 Processos erosivos hídricos em sulcos

Erosão em sulcos (ou ravinas) são geralmente diferenciados pela profundidade da erosão linear em forma de canal concentrando o fluxo do escoamento em algumas áreas de grande comprimento e pequena largura de forma irregular (SALOMÃO, 1999).

A formação dos sulcos ocorre devido a confluência da água da chuva com a diminuição da taxa de infiltração do solo devido à saturação do mesmo. Quanto maior a intensidade da chuva, mais rápido ocorre o aparecimento do escoamento superficial linear e caso a chuva perpetue por um longo período, maior será o volume e a velocidade da água presente nos sulcos.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), é o resultado de pequenas irregularidades na declividade que faz com que a enxurrada se concentre em alguns pontos do terreno, atingindo velocidade e volume suficientes para formar canais mais profundos. Esse tipo de processo hídrico é mais perceptível que a forma laminar e de semelhante severidade.

2.2.4.4 Voçorocas (ou boçorocas)

O termo voçorocas ou boçorocas tem sua origem no guarani e significam “terra rasgada”. Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), esse tipo de erosão é uma forma excepcional ocasionado por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco, causando um aumento gradativo, devido ao deslocamento de grandes massas de solo formando, assim grandes cavidades tanto em extensão quanto profundidade.

Importante notar a diferença que deve ser dada entre as ravinas e voçorocas. Salomão (1999), afirma que com a formação e aprofundamento dos sulcos pode ocorrer o encontro com o lençol freático que acaba somando o efeito erosivo junto à

ravina pela ação tanto da água superficial quanto subsuperficial. A partir desse ponto as erosões tomam grandes dimensões e são chamadas de voçorocas, diferenciando-se, portanto das ravinas, que são denominadas até o momento onde não há interferência das águas subsuperficiais.

As voçorocas se caracterizam pela elevada capacidade de destruição da área, pois durante o seu processo de acontecimentos ocorrem diferentes fenômenos que vão desencadeando efeitos negativos no local. Até o aparecimento da voçoroca, grandes áreas já foram afetadas pela erosão superficial, erosão interna, escorregamentos e desabamentos. Dessa forma, a voçorocas trazem uma grande instabilidade para o ecossistema em que se encontra devido aos efeitos negativos até a sua formação e a dificuldade em reverter o processo.

A seguir, é apresentado na Tabela 8, após uma adaptação de Araújo (2011) e Vandaele *et al.* (1996), um comparativo entre as principais características dos tipos de erosão mencionados nos tópicos anteriores.

Tabela 8 - Características dos processos erosivos (continua)

Características	Erosão Laminar	Sulcos e Ravinas	Boçorocas
<i>Locais de ocorrência</i>	Em relevos com declive suave e sobre o plano de drenagem	À montante de canais de drenagem rasos	Em canais bem definidos e de grande tamanho
<i>Tamanho</i>	Qualquer tamanho, porém, menor que canais de fluxo concentrado	Variado	São maiores em largura e profundidade em relação aos sulcos e ravinas
<i>Padrão de fluxo</i>	Superficialmente paralelos ao solo confluindo para os canais	Forma dendrítica por onde a água tende a escoar devido às imperfeições do terreno	Dendríticos por cursos naturais de escoamento
<i>Cortes transversais</i>	Ausentes ou pouco definidos	Geralmente largos e pouco profundo. Parede laterais não definidas	Geralmente mais estreitos em relação à profundidade. Paredes íngremes.
<i>Remoção ou alterações do processo</i>	Pode ser modificado com trabalhos de recuperação do solo	Feições temporárias ou permanentes. Pode ser removida com alguns meios de recuperação do solo	Demanda grande investimento para recuperação da área

Tabela 8 – Características dos processos erosivos (conclusão)

<i>Visibilidade</i>	Difícilmente notável	Visíveis	Facilmente visíveis
<i>Sequência do processo erosivo</i>	Separação e transporte por gotas de chuva e fluxo superficial	Separação e transporte por fluxo superficial	Destacamento e transporte por fluxo superficial, com quedas de bancos instáveis nos canais e alargamento da cabeceira

Fonte: Adaptado de Araújo (2011) e Vandaele *et al.* (1996)

2.3 Bacia hidrográfica como área de avaliação e estudo científico

De acordo com Botelho (1999), entende-se como bacia hidrográfica (ou de drenagem) a área da superfície terrestre drenada por um rio principal e seus tributários sendo limitada pelos divisores de água. A bacia hidrográfica pode ser delimitada sobre uma base cartográfica de acordo com as cotas altimétricas, seja por cartas topográficas ou modelos digitais de elevação do terreno.

Ainda com referência ao autor citado anteriormente, diversos pesquisadores chamam atenção para a bacia hidrográfica como unidade natural de análise da superfície terrestre, onde é possível reconhecer e estudar as relações internas existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos atuantes. Dessa forma, a bacia de drenagem é considerada como uma unidade ideal de planejamento de uso das terras e gestão ambiental. Tendo sua limitação baseada em critérios geomorfológicos, as bacias de drenagem levam vantagens sobre unidades de planejamento definidas por outros atributos, cujos traçados dos limites podem ser bastante imprecisos.

Com relação ao uso do conceito de bacia hidrográfica no Brasil, na década de 80 e 90, diversos trabalhos foram baseados na aplicação das bacias como unidade fundamental de estudo contrário às áreas anteriormente muito utilizadas como os distritos e municípios. A criação do Programa Nacional de Microbacia Hidrográfica (PNMH) através do Decreto-Lei número 94.076 de 05 de março de 1987, expandiu o uso do termo, sendo este definido como sendo uma área drenada por um curso de água e seus afluentes, a montante de uma determinada seção transversal, para a qual convergem as águas que drenam a área considerada (BRASIL, 1987, apud BOTELHO, 1999).

Com relação ao tamanho, para alguns tipos de estudos há a adoção do termo de microbacia, que segundo Freitas e Kerr (1996), depende do objetivo do trabalho que se pretende realizar. De um modo geral deve abranger uma área suficientemente grande, para que se possam identificar as relações existentes entre os diversos elementos do quadro socioambiental caracterizando os escopos do estudo aplicado àquele local. E deve ser pequena o suficiente para facilitar a pesquisa de forma a trazer um custo-benefício ao trabalho realizado. Dessa forma, o termo microbacia está relacionado diretamente com os projetos de planejamento e de conversação ambiental sendo que a conceituação e delimitação da área está diretamente ligada com os elementos envolvidos na pesquisa, como técnicas, recursos materiais, equipe de trabalho e tempo de projeto.

A microbacia hidrográfica oferece, portanto, a vantagem de um gerenciamento simultâneo, interdependente e cumulativo de seus aspectos econômicos, sociais e ambientais, através da possibilidade de realizar um planejamento e administração integrada dos recursos naturais, solo e água, ampliando assim, notavelmente, a sinergia e a potencialidade dos processos operados, além de oferecer condições geográficas e sociais favoráveis à organização comunitária (TEODORO *et al.*, 2007).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfométricas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem e solo), conforme Tabela 9, e do tipo da cobertura vegetal existente. Assim, as características físicas e bióticas de uma bacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, dentre outros, a infiltração e quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração, os escoamentos superficiais e subsuperficial (LIMA, 1976).

Tabela 9 - Características morfométricas de bacias hidrográficas.

Características Morfométricas	Tipos De Análises
Informações geométricas	Área total
	Perímetro total
	Coefficiente de compacidade
	Fator de forma
	Índice de circularidade
	Padrão de drenagem
Informações sobre o relevo	Orientação
	Declividade Mínima, Média e Máxima
	Altitude Mínima, Média e Máxima
	Declividade média do curso principal
Informações sobre a rede de drenagem	Comprimento do curso principal
	Comprimento total dos cursos
	Densidade de drenagem
	Ordem dos cursos

Fonte: Adaptado de Teodoro *et al.* (2007)

Portanto, a bacia hidrográfica é um sistema bem caracterizado, identificado pela entrada de material e energia (através da precipitação atmosférica), pela circulação interna deste material (o escoamento superficial, por exemplo) e por sua saída, (que num curso fluvial corresponde à sua foz). Este sistema, individualizado para uma facilitação de análise, pode ser considerado um subsistema, quando inserido em um outro sistema, sendo influenciado e influenciando através dos fluxos que se estabelecem. O estudo e a análise da drenagem devem ser realizados no contexto de uma bacia hidrográfica sob uma visão global do sistema, pois os fatores como a dinâmica do clima, a vegetação e a litologia, vão interferir direta ou indiretamente no sistema.

2.4 Geoprocessamento como ferramenta de análise espacial

O geoprocessamento constitui um conjunto de tecnologias que permitem a obtenção e análise de informações espaciais, nos quais os resultados obtidos poderão ser aplicados em outros trabalhos que possuam como escopo à representação espacial de diversos atributos, como por exemplo, dados do meio físico (geologia, hidrologia, morfologia entre outros) (NEVES, 2017). As principais categorias de técnicas relacionadas ao tratamento de informações espaciais são:

- Técnicas para coleta de informação espacial (cartografia, sensoriamento remoto, GPS, topografia convencional, fotogrametria, levantamento de dados alfanuméricos);
- Técnicas de armazenamento de informação espacial (bando de dados);
- Técnicas de tratamento e análise de informação espacial (modelagem de dados, geoestatísticas, aritmética lógica, fundações topológicas);
- Técnicas para o uso integrado de informação espacial (GIS ou SIG – sistema de informações geográficas) (CÂMARA, 1995).

De acordo com Câmara (1995), um sistema de Geoprocessamento armazena a geometria e os atributos dos dados, que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre numa projeção cartográfica. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados.

Neste sentido, o geoprocessamento pode ser bastante útil na abordagem integrada, por ser uma ferramenta computacional poderosa o qual compõe diversos bancos de dados, de diferentes setores, permitindo assim a análise matemática e estatística desses dados a partir de metodologias selecionados para o fim desejado (HAMADA; GONÇALVES, 2007).

Portanto, o geoprocessamento tem sido muito empregado pelo órgãos governamentais e entidades privadas, objetivando integrar os dados espaciais e não espaciais em seus projetos e estudos relacionados ao ambiente, buscando atender a necessidade de cada escopo de estudo. Os principais exemplos das áreas aplicação do geoprocessamento são: (1) Manejo e conservação de recursos naturais; (2) Gestão das explorações agrícolas; (3) Planejamento de área urbana; (4) Gestão das instalações; (5) Administração pública; (6) Comércio e (7) Saúde pública (HAMADA e GONÇALVES, 2007).

2.4.1 Sistemas de Informações Geográficas

De acordo com Hamada e Gonçalves (2007), existem diversas definições para o significado de SIG na literatura, sendo que são normalmente relacionadas com as categorias, temas, ferramentas, base de dados espacial e a organização destas

informações referenciadas. De uma forma geral, o SIG é uma ferramenta computacional e manual que manipula dados geográficos referenciados que são mantidos em formato digital para atender ao uso do operador.

Para Câmara (1995), os SIG têm como características integrar, em uma única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos do terreno assim como oferecer mecanismos para combinar todas estas informações através de algoritmos de manipulação e análise para que se possa consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciada.

As principais vantagens em se utilizar um SIG para os trabalhos de geoprocessamento, de acordo com Aronoff (1989), são:

- Os dados armazenados digitalmente estão em uma forma compacta se comparada com mapas de papel;
- A maior parte dos dados pode ser mantida e recuperada com grande velocidade a um menor custo, considerando o seu uso em um sistema computacional;
- A facilidade de gerenciar e utilizar os dados espaciais e seus atributos podendo fazer a correlação entre eles em uma única análise, e um curto espaço de tempo com grande agilidade, são incomparáveis com os métodos manuais, e;
- A facilidade de realizar rapidamente análises complexas fornecem vantagem tanto quantitativamente quanto qualitativamente, sendo assim é possível o uso de métodos interativos antes não permitidos devido à complexidade de se realizar esse tipo de trabalho sem ajuda computacional.

Em resumo, as vantagens mais comuns da utilização do SIG são que os dados, uma vez dentro do sistema, podem ser trabalhados com rapidez, e, ainda, o software permite diferentes análises dos dados de forma eficiente, utilizando ferramentas matemáticas e estatísticas sofisticadas e com menor subjetividade caso fossem conduzidas de forma manual. Por fim, o SIG também facilita processos de tomada de decisão, possibilitando a atualização de dados e mapas como suporte.

De uma forma geral, de acordo com Câmara (1995), um SIG possui os seguintes componentes: (1) interface com os usuários; (2) entrada e integração dos

dados; (3) funções de processamento gráficos de imagens; (4) visualização e plotagem; (5) armazenamento e recuperação de dados (bando de dados geográficos). Estes componentes têm como características se relacionarem de forma hierárquica. No nível do usuário é este que define como o sistema será operado e gerado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais para atender à necessidade de estudo do usuário (entrada, edição, análise, visualização e saída). No nível interno de programação do sistema, a gerência do banco de dados oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos.

Diversos softwares computacionais possuem as características descritas anteriormente e são amplamente utilizadas como suporte para o trabalho com geoprocessamento. A Tabela 10 a seguir cita alguns desses programas.

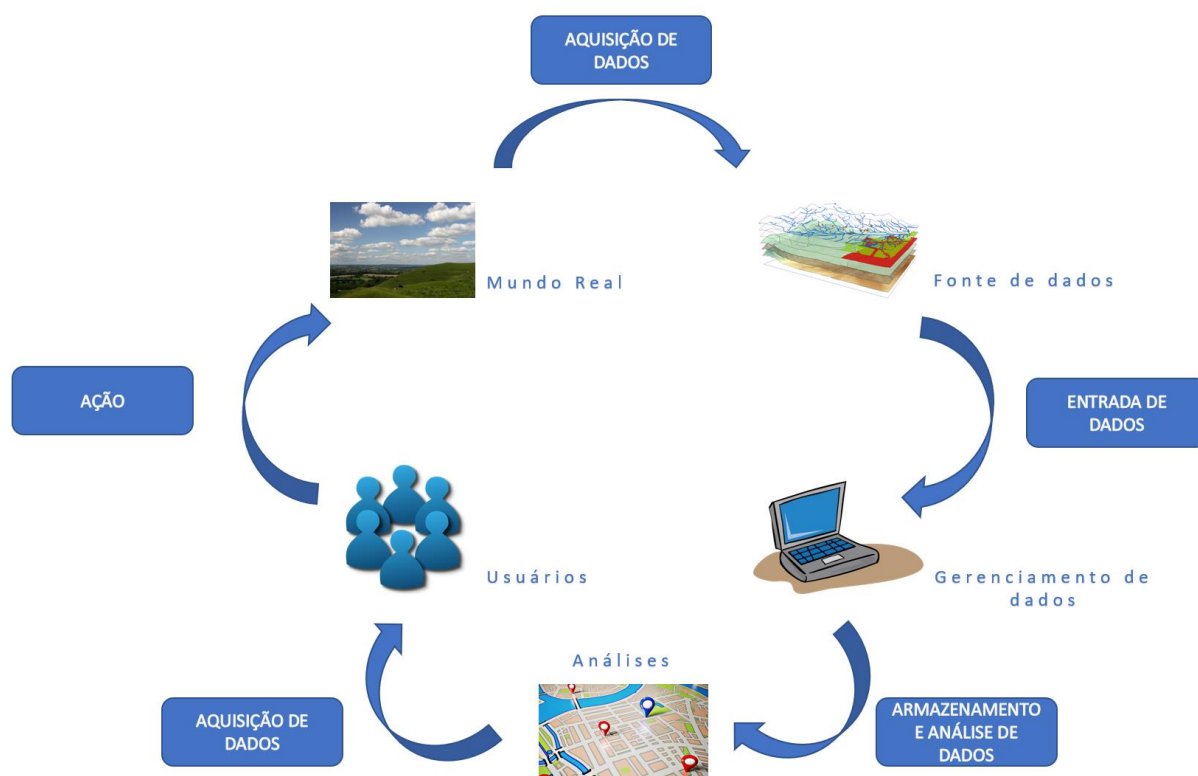
Tabela 10 - Principais softwares na área de geoprocessamento

Software		Tipo	Distribuidor
<i>SPRING</i>		SIG	INPE
<i>ARCGIS</i>		SIG	ESRI
<i>TERRSET</i>		SIG	TRIMBLE
<i>MAPINFO</i>		SIG	GEOGRAPH
<i>ENVI</i>	Processamento de imagens		SULSOFT
<i>IMAGER</i>	Processamento de imagens		SISGRAPH
<i>QGIS</i>		SIG	OSGEO

Fonte: Adaptado de Neves (2017)

Na Figura 7 está apresentado a esquemática de funcionamento e utilização geral de um SIG. É possível observar que o processo funciona como um ciclo com as fontes de dados sendo interpretações da realidade uma vez que são obtidas no mundo real. A etapa consiste na entrada dos dados na plataforma utilizada, gerenciamento, armazenamento e análise conforme necessidade do operador, em seguida são geradas as informações de acordo com a aplicação do estudo.

Figura 7 – Representação esquemática geral de utilização do SIG



Fonte: Adaptado de Hamada e Gonçalves (2007)

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram produzidos utilizando o SIG como ferramenta de suporte para o estudo de problemas ambientais, entre eles a erosão. Em um estudo conduzido por Andrade, Suertegaray e Guasselli (2006) foi realizada uma análise utilizando SIG para investigar a relação entre a formação de areais, no sudoeste do Rio Grande do Sul, com a orientação do relevo. Para tanto, foi realizado a classificação digital da área de estudo, seguido pela determinação da orientação das vertentes da bacia com base em imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para posterior tabulação cruzada entre as informações. A análise espacial forneceu dados suficientes para constatar uma relação próxima entre as variáveis estudadas, atingindo o objetivo dos pesquisadores em verificar a relação entre a orientação das vertentes e a formação de areais.

Outro tipo de estudo que frequentemente utiliza as ferramentas de um SIG é a avaliação multitemporal de uma região para verificar se a evolução do uso e ocupação. Em um estudo realizado por Paula *et al.* (2012), foi conduzido uma análise multitemporal do uso e ocupação do solo na Zona de Expansão Urbana Norte de Londrina – PR entre os anos de 1987 e 2004. As técnicas utilizadas foram com base

em processamento digital e classificação supervisionada de verossimilhança obtendo assim as classes de uso da região estudada. Os resultados foram apresentando por meio de mapas temáticos mostrando qualitativamente e quantitativamente a real condição do uso do solo nos dois anos estudados. Por meio do uso do SIG como ferramenta de apoio, os autores constataram que a região não vem sendo preservada de acordo com as normas e diretrizes vigentes.

Por fim, os pesquisadores Valladares *et al.* (2012), utilizaram o SIG para a aplicação de um modelo multicritério aditivo com o intuito de criar mapas de susceptibilidade à erosão em uma área rural no município de Guararapes, São Paulo. A avaliação ambiental conduzida por esses pesquisadores utilizou dados como o relevo, pedologia, uso e cobertura das terras da região por meio da interpretação digital do modelo digital de elevação do terreno (MDE). O método multicritério adotado foi validado por meio da equação universal de perda do solo, tendo como resultado uma boa correspondência entre o modelo e a equação.

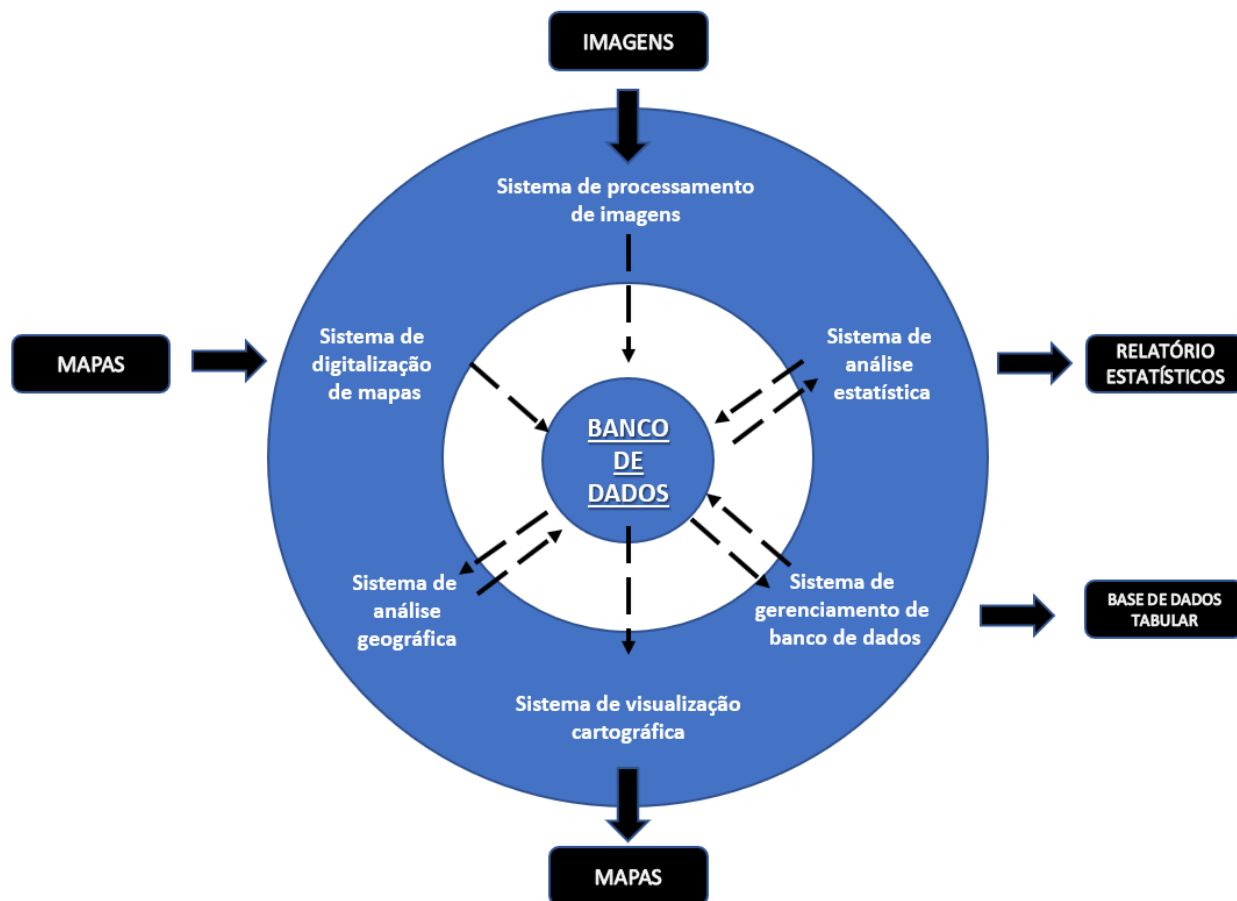
2.4.1.1 *Componentes de um Sistema de Informação Geográfica*

De acordo com Eastman (1997), embora a ideia de SIG remeta à um único elemento, ele possui, na realidade, uma variedade de diferentes componentes que juntamente formam um sistema. Na Figura 8 a seguir estão apresentados de forma geral os principais componentes que compõe um SIG, sendo que nem todos os sistemas possuem estes elementos.

Hamada e Gonçalves (2007), com base em Eastman (1998), exemplifica cada um dos elementos de um SIG, de acordo com a Figura 8, da seguinte forma:

- a. O sistema central ou fundamental para o funcionamento de um SIG é a sua base de dados, sendo esta uma coleção de mapas e informações no formato digital. Com base nos dados são feitas diversas análises conforme a necessidade de operação. O banco de dados é separado em duas partes: uma espacial, com a geografia e feições da área e outro banco com os atributos descrevendo as características e qualidades destes dados geográficos;
- b. O sistema de processamento de imagem permite a análise de imagens de sensoriamento remoto, de radar e de fotografia aérea;

Figura 8 - Componentes de um SIG



Fonte: Adaptado de Eastman (1998)

- c. O sistema de digitalização de mapas permite a entrada de dados de mapas em papel e transformação dessas informações no formato digital;
- d. O sistema de análise geográfica proporciona a análise de dados ou atributos baseados em suas características espaciais. Por exemplo, para calcular a distância entre duas cidades e a área ocupada no município por uma cultura agrícola;
- e. O sistema de suporte à decisão é uma das mais importantes funções de um SIG e possibilita utilizar ferramentas matemáticas e estatísticas especialmente desenvolvidas para este fim.
- f. O sistema de exibição ou visualização cartográfica permite selecionar os elementos do banco de dados e produzir um mapa no monitor do computador ou a saída para uma impressora ou “plotter”;

- g. O termo Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), normalmente, faz referência a um tipo de “software” que é utilizado para a entrada, gerenciamento e análise de dados de atributo;
- h. O sistema de análise estatística apresenta uma série de rotinas para a descrição estatística de dados espaciais.

2.4.1.2 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é uma importante fonte de dados para o SIG, uma vez que permite a avaliação de uma grande quantidade de dados espaciais, o que permite uma visão panorâmica das unidades de paisagem existentes na superfície. Dessa forma, possibilita a interpretação, assim como a classificação destas unidades, sem a necessidade do contato direto com a área avaliada, diminuindo o tempo demandado na pesquisa, e por consequência, o custo final. Logo, o sensoriamento remoto tem sido englobado em diversos tipos de análises geoambientais, incluindo na avaliação de processos erosivos, auxiliando no monitoramento multitemporal das transformações impostas ao local avaliado seja por ações antrópicas ou naturais (ARAUJO, 2011).

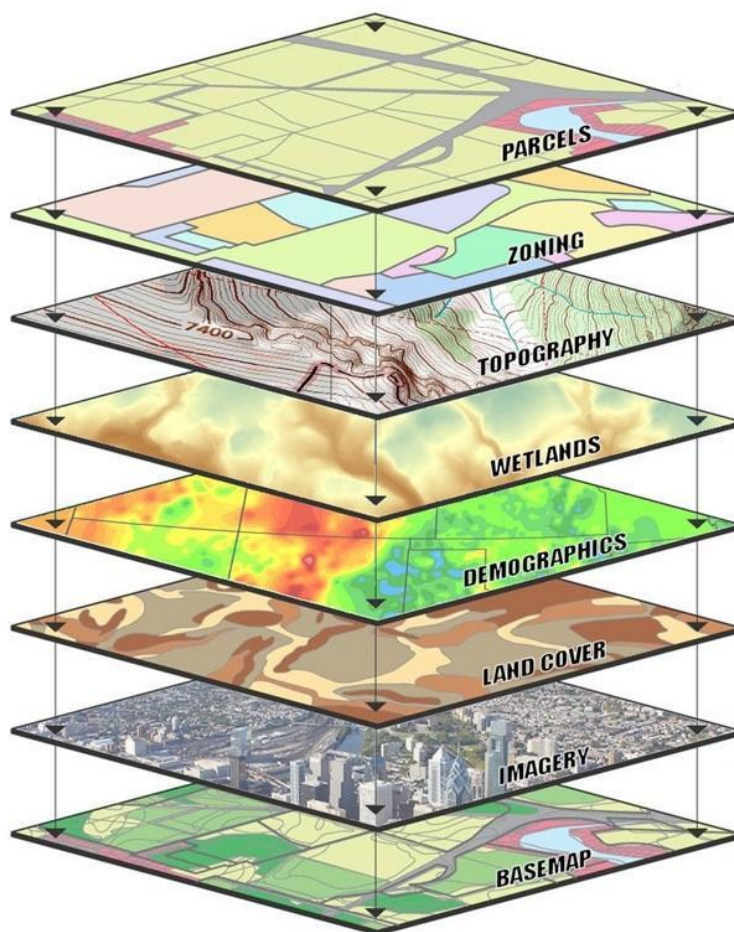
A conceituação de sensoriamento remoto engloba não só o processo de obtenção do registro e análise das interações e radiações eletromagnéticas e as substâncias componentes do planeta, como também considera os mecanismos de obtenção destas informações, seja por satélites ou outras formas (ARAUJO, 2011).

2.4.1.3 Modelo de dados utilizado nos SIG

De acordo com Longley *et al.* (2005), uma das principais formas de apresentação e composição dos dados em uma plataforma de SIG é a compilação destes em layers (camadas). Estes layers nada mais são que representações de cada um dos componentes do ambiente, incluindo os corpos hídricos, vegetação natural, solo, relevo, modelos do terreno entre outros aspectos naturais ou antrópicos relativos à área analisada, conforme visto na Figura 9. A ideia de apresentar cada informação do terreno em camadas sugere que cada característica é única e pode ser comparada

às outras informações conforme a necessidade do operador, onde cada layer contribui independentemente como uma informação.

Figura 9 - Visualização dos layers aplicados ao bando de dados de um SIG



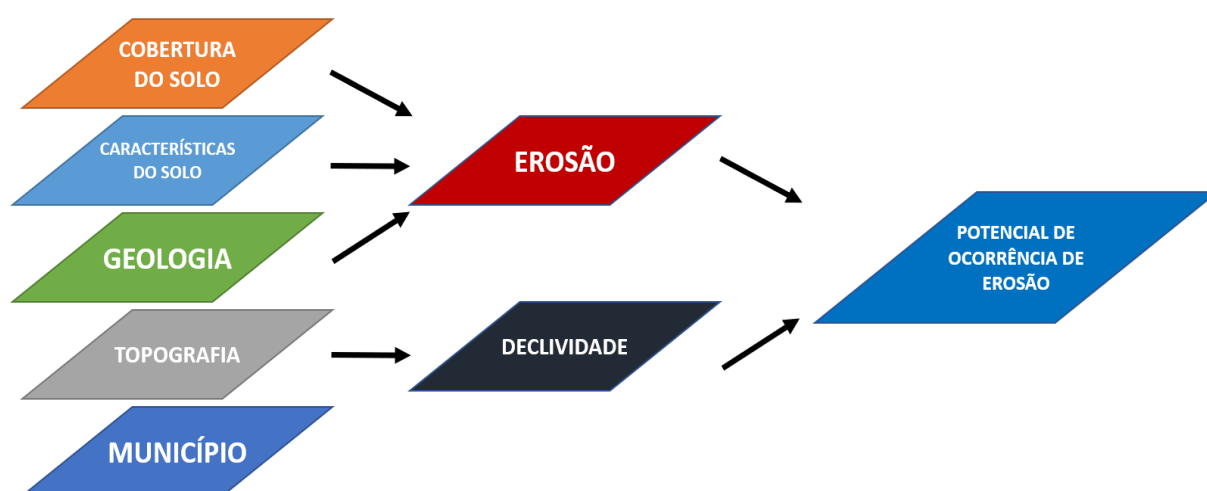
Fonte: USGS (2016)

Esta forma de apresentação dos dados permite compilar as informações em forma de planos de informações (PIs) com cada nível representando uma mesma área, mas cada qual correspondente a uma perspectiva diferente da realidade geográfica da área, sendo assim, pode ser considerado como um conjunto mínimo de feições físicas e culturais que fornecem informações necessárias ao reconhecimento topográfico da região. Essa aproximação é muito utilizada em SIG para a avaliação de informações referentes às bacias hidrográficas e suas implicações no âmbito ambiental

Esta organização em camadas permite ao operador combinar parâmetros simples da modelagem de dados para derivar níveis de informação produzindo

conjuntos de informações que representam relações complexas do mundo real. Por exemplo, através de níveis de características simples como o uso da terra, solos, geologia, topografia e divisão municipal. Por meio de operações aplicadas ao nível de informação topografia, através de um modelo digital do terreno, é computado o nível de informação de declividade e através da combinação dos demais níveis de informação, com a aplicação de operações espaciais e métricas, é encontrado o nível de informação de erodibilidade. A partir de análises sobre estes níveis gerados é criado a camada com a informação que retrata as áreas com potencial de erosão. Este último nível pode ser combinado com o nível de informação cadastral, contendo a divisão municipal, de forma a facilitar a visualização dos distritos com áreas mais propícias à erosão, criando, assim, a carta de susceptibilidade à erosão, conforme Figura 10 (SENA, 2008).

Figura 10 - Exemplo de análises utilizando as camadas de dados de um SIG para a avaliação do potencial de erosão



Fonte: Adaptado de Sena (2008)

2.4.1.4 Modelos de representação do terreno

O terreno é um componente fundamental para o estudo de processos terrestres e atmosféricos. A importância é tanta que entendendo as características de um terreno é possível entender também os processos que governam um determinado ecossistema. Dessa forma, análises e representações da superfície terrestre tem

fornecido dados de suplementos para diversas atividades utilizando SIG e a modelagem ambiental (GALLANT; HUTCHINSON, 2005).

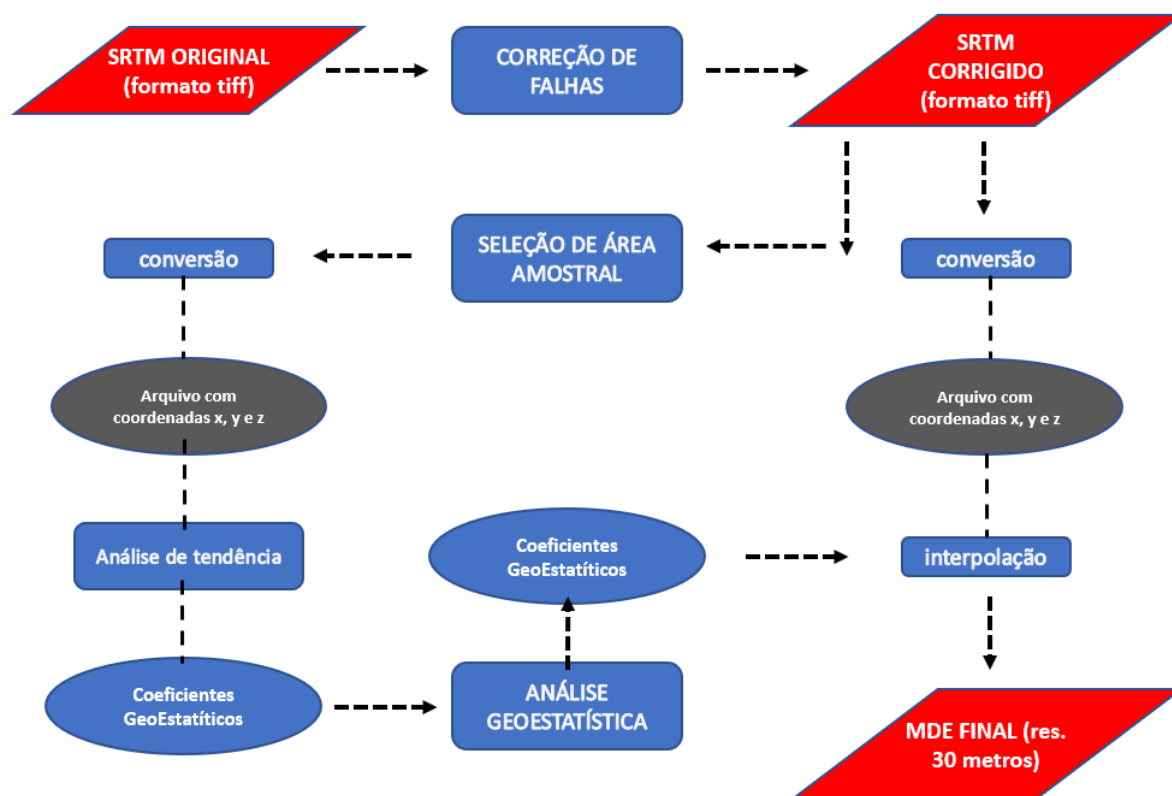
Uma das principais formas de representação da superfície terrestre é a partir da utilização de modelos digitais de elevação do terreno (MDE, do inglês “digital elevation model”). A captura dos dados de elevação para o desenho do contorno do terreno pode ser feita através de imagens aéreas, fotos de satélites ou mesmo cartas topográficas. A utilização de valores de altitude de curvas de nível são ainda uma das maiores fontes de dados para a elaboração de MDE e refletem de forma precisa as feições do local (GALLANT; HUTCHINSON, 2005).

A geração dos mapas de MDE são, em sua maior parte, obtidos através de interpolação matemática dos dados adquiridos. Como advento e o avanço da computação gráfica, a interpolação utilizando métodos baseados em triangulação tem sido o que melhor apresenta uma real situação do terreno em comparação com o método que considerada a interpolação em uma base quadrática.

Uma outra forma de criação dos MDE é a partir da utilização de imagens de satélites da missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), conforme relatado por Valeriano (2004). O projeto advém de cooperação entre a NASA e a NIMA (National Imagery and Mapping Agency), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália. O voo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, durante o qual foram percorridas 16 órbitas por dia, num total de 176 órbitas. A missão foi concluída com a coleta de dados que vêm sendo processados para a formação de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Grande parte do território nacional é provido de mapeamento em escalas demasiadamente generalizadas para várias utilizações da informação topográfica. Por este aspecto, pode-se considerar o dado SRTM a melhor informação topográfica já disponibilizada para grande parte de nosso território, fornecendo dados com uma resolução de 90 metros. Conforme figura 11, a partir de um tratamento de dados com aplicação da geoestatística é possível a obtenção de um modelo final de MDE de resolução próxima à 30 metros.

Figura 11 - Fluxo de tratamento dos dados SRTM para a elaboração do MDE



Fonte: Adaptado de Valeriano (2004)

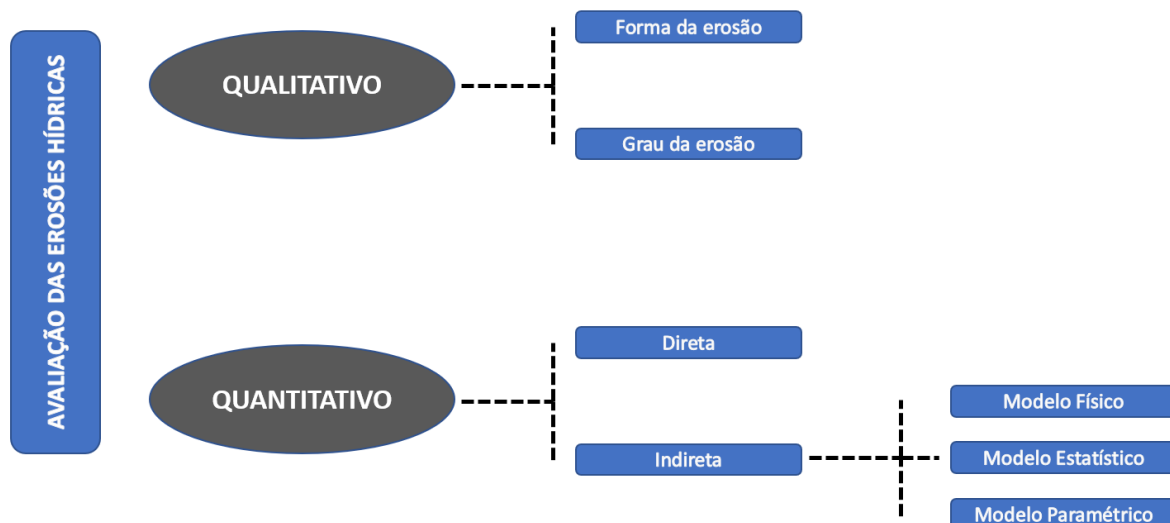
2.5 Modelos, métodos e formas de avaliação dos processos erosivos

A avaliação da erosão hídrica tem como princípio a definição e o levantamento das informações referentes aos fatores que condicionam os processos erosivos. Para tanto, são utilizadas técnicas de estudo em campo, análises, ensaios e avaliações que permitam a obtenção das relações existentes entre os diversos fatores influenciadores. As análises podem incluir a avaliação espacial e temporal, com a finalidade de identificar as informações de causa e efeito, favorecendo a elaboração de metodologias de estudo dos processos (ALMOROX *et al.*, 2010).

Conforme Figura 12, Almorox *et al.* (2010), propõem duas aproximações para a avaliação dos processos erosivos. A avaliação qualitativa, que leva em consideração a forma e o grau da erosão através de medidas de tamanho e a avaliação quantitativa que considera as informações únicas destes fenômenos por meio de análises aprofundadas envolvendo conceitos matemáticos, físicos e químicos. A avaliação quantitativa permite uma modelagem e representação

numérica do processo, com base em parâmetros pré-definidos obtidos por meio de ensaios ou estimações obtidas através de modelos físicos, estatísticos e paramétricos.

Figura 12 - Métodos de avaliação da erosão hídrica



Fonte: Adaptado de Almorox *et al.* (2010)

De acordo com Beskow *et al.* (2009), resultados quantitativos relacionados com a taxa de perda dos solos e estratégias de conservação geralmente não estão disponíveis para áreas com problemas de erosão. Entretanto, a avaliação quantitativa da erosão e possíveis estratégias de gestão de bacias são necessárias tanto para planejamento de órgãos locais ou governamentais associadas com o desenvolvimento sustentável. Assim, modelos de simulação de erosão, especialmente os modelos distribuídos, são úteis para avaliar diferentes estratégias para a gestão do uso e ocupação do solo visando a melhoria das áreas atingidas por esse processo.

Muitos dos métodos quantitativos para avaliar o potencial de erosão de determinado local são caros e requerem um grande tempo de estudo e pesquisa. Além disso, a simulação da distribuição da erosão dos solos em bacias hidrográficas é necessária a utilização de técnicas de mapeamento e interpolação com o intuito de criar uma base de dados útil para o estudo. Dessa forma, para a integração dos

modelos de predição, dados de campo e dados obtidos através de sensoriamento remoto como parâmetros de entrada em um sistema – formando, assim, um banco de dados - pode ser feita com a ajuda de Sistemas de Informações Geográficas (BESKOW *et al.*, 2009; GANASRI; RAMESH, 2016).

A principal razão de utilizar um SIG é que os processos de erosão variam espacialmente, e, assim, um sistema de malha de células deve ser utilizado para que a variação espacial possa ser considerada com os mínimos detalhes em todo o terreno estudado. Outra importante consideração é a quantidade de dados necessários para um enorme número de células com o intuito de criar uma representação mais próximo possível da realidade, tornando o trabalho manual para a compilação de todos esses dados praticamente inviável, sendo muito facilitado pelo sistema de criação e gerenciamento de banco de dados que um SIG propicia (BESKOW *et al.*, 2009).

2.5.1 Métodos quantitativos e principais modelos

De acordo com o escopo deste trabalho, as metodologias que serão utilizadas são baseadas em métodos quantitativos com estimativa de áreas possíveis de sofrerem problemas com erosão de características indiretas e paramétricas, sendo os métodos qualitativos específicos para a área agrária com outras finalidades de aplicação e resultados.

De acordo com Almorox *et al.* (2010), os modelos físicos possibilitam a compreensão dos mecanismos da erosão com base nas leis da física, que influenciam diretamente na geração e transporte de sedimentos; os modelos conceituais ou paramétricos permitem a representação dos processos por meio de modelos hidrológicos e fatores de causa e efeito das formulações empíricas. Por fim, os modelos estatísticos relacionam as medidas de intensificação da degradação com os fatores de ocorrência dos processos erosivos, como o clima, solo, relevo e intensidade de chuva e tem como principal característica serem baseados na hipótese de sistema estacionário, ou seja, assume-se que condições subjacentes permanecem inalteradas (FUREGATTI, 2012).

A Tabela 11 apresentada a seguir mostra exemplos dos principais modelos que podem ser aplicadas na avaliação indireta.

Tabela 11 – Principais Modelos Quantitativos Indiretos

Tipo	Autor	Modelo
Paramétricos	Wischmeier e Smith (1978)	USLE
	Renard <i>et al.</i> (1997)	RUSLE
Conceituais	Young <i>et al.</i> (1989)	AGNPS (Agricultural Non-Point Source)
	Wilkinson (2004)	SEDNET
	Neitsch (2004)	SWAT (Soil and water assessment tool)
Base Física	Beasley (1977)	ANSWER (Areal Non-Point Source Watershed Environmental Response Simulation)
	Schmidt <i>et al.</i> (1999)	EROSION – 3D
	Morgan <i>et al.</i> (1998)	EUROSEN (European Soil Erosion Model)
	Rose <i>et al.</i> (1997)	GUEST (Griffith University Erosion System Template)
	Smith <i>et al.</i> (1995)	KINEROS (Kinematic Erosion Simulation)
	De Roo (1996)	LISEM (Limburg Soil Erosion Model)
	Nunes (2005)	MEFIDIS (Modelo de erosão físico distribuído)
	Kirkby <i>et al.</i> (2004)	PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment)
	Montgomery e Dietrich	SHALSTAB
	O’Loughlin (1986)	TOPOG
	Laflen <i>et al.</i> (1991)	WEPP (Water Erosion Prediction Project)

Fonte: Adaptado de Furegatti (2012) e Neves (2017)

Dentre os modelos citados anteriormente, alguns deles se destacam como ferramentas de auxílio na predição de processo erosivos, como o WEPP – Water Erosion Prediction Project – que tem a capacidade de simular o clima, crescimento de plantas, decomposição de resíduos vegetais, infiltração, balanço hídrico, escoamento superficial, perda de solo, deposição e carreamento de sedimentos para diferentes períodos de estudo e análise. Para facilitar a aplicação desse modelo, foi criado o programa computacional GeoWEPP que tem como vantagem permitir a utilização e processamento de modelos digitais de elevação do terreno, imagens de satélites, informações de ensaios do solo em um ambiente de SIG (FLANAGAN; NEARING, 1995; RENSCHLER, 2003).

O LISEM – Limburg Soil Erosion Model – é um modelo físico que foi escrito em formato raster e implementado em um Sistema de Informações Geográficas, permitindo a simulação hidrológica e o transporte de sedimentos durante e

imediatamente depois de uma chuva única em represas. Os processos e informações necessárias para o funcionamento do modelo são: precipitação, armazenamento superficial, infiltração, movimento vertical da água no solo, escoamento, escoamento em canais, destacamento de partículas, destacamento devido ao escoamento e capacidade de transporte de sedimentos. Além disso, consegue ainda incorporar ações antrópicas como o tráfego de veículos rurais e a influência de pequenas estradas não pavimentadas e pavimentadas nas formações dos processos erosivos (DE ROO *et al.*, 1996).

O método SWAT – Soil and Water Assessment Tool – é um derivado de um modelo físico com avaliação intermitente temporal e foi desenvolvido para simular o impacto de água, sedimentos e produtos químicos em uma bacia. Os principais fatores utilizados nesse método são: clima, hidrologia, temperatura do solo, propriedades do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas, bactérias e uso e ocupação. Para facilitar a utilização e compilação desses fatores foi desenvolvido uma extensão para o programa ArcGIS – ArcView chamada de ArcSWAT voltado principalmente para a área agrária de estudo das erosões (GASSMAN *et al.*, 2007).

De acordo com Furegatti (2012), os modelos apresentados na Tabela 11, de forma geral, consideram os processos hidrológicos (precipitação e de escoamento) e de movimento de partículas do solo (destacamento e transporte de sedimento) com a finalidade de mensurar a quantidade de solo perdido, ou de prever essa quantidade. Há ainda diversos métodos que utilizam informações químicas do solo e da água (nutrientes e poluentes). Esses modelos de predição consideram a perda de solo por erosão laminar, devido ao fluxo superficial difuso, e por erosão linear através da formação de sulcos (rills), voçorocas (gullies) e canais. Os modelos que analisam os processos de sulco são: GUEST, MEDRUSH, ANSWERS, LISEM, CREAMS, EUROSEM, WEPP, MEFIDIS, PSIAC, FSM, VSD, GAVRILOVIC, EHU, CORIEN e WSM). Poucos avaliam a formação de voçorocas, sendo eles: AGNPS, SEDNET, MEDRUSH, ANSWERS E GLEAMS.

Para Beskow *et al.* (2009) as desvantagens de muitos desses modelos são: (1) é necessário um extenso conjunto de dados de entrada para os cálculos e processos de calibração para a validação da metodologia; (2) são necessários análises complexas de laboratório ou extensas e caras visitas ao campo para coleta de dados;

(3) variações de parâmetro de calibração, demandando do operador conhecimento técnicos específicos de cada metodologia.

Entre todos os modelos apresentados, a Equação Universal de Perda de Solos (USLE) e sua forma revisada (RUSLE) são os mais conhecidos e utilizados, sendo considerado o modelo mais simples para a predição de processos erosivos (BESKOW *et al.*, 2009). Isso se deve principalmente ao fato do modelo ter sido criado para ser utilizado à níveis locais de estudo e não como uma ferramenta estruturada para pesquisas científicas. A ideia básica era de utilizar dados, diagramas e tabelas em campo e com cálculos simples no próprio local calcular a probabilidade de erosão, com base na perda anual de solos, para a área em estudo (RENARD *et al.*, 2011).

A equação atribuída ao RUSLE é conhecida como:

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

Equação 1

onde A é a perda de solo calculada por unidade de área, expressa em unidades selecionadas de acordo com K e para o período selecionado em R (é comum a adoção prática de valores para os Estados Unidos de toneladas por acre por ano e no Brasil de toneladas por hectares por ano); R é um índice baseado nos valores de precipitação e de escoamento – apenas em locais onde este é significativo; K é o fator de erodibilidade do solo; L e S são relacionados ao comprimento de rampa a declividade em relação ao terreno; C é atribuído ao uso e ocupação do solo, sendo que varia de zero para um local completamente não erodível até 1 para um local com grande tendência à erosão, sendo estes valores previamente estabelecidas para cada formação e características de cobertura da área estudada; e P é a prática de ações de conservação do solo, como a criação de curvas de nível, cobertura vegetal e terraplanagem (RENARD *et al.*, 2011).

A Tabela 12 a seguir apresenta um resumo de diversas formas para calcular os parâmetros utilizados na equação da USLE conforme descrito pelo autor Lu *et al.* (2004) seguido pelas referências de cada trabalho.

As desvantagens do uso de USLE se deve ao fato de por ser um método baseado em valores de dados empíricos coletados em pequenas áreas ou sub bacias com relativa uniformidade no relevo, a reaplicação do método fica restrito a locais com semelhante características. Em suma, os resultados encontrados por meio da

aplicação do USLE não incluem qualquer impacto do fluxo concentrado de canais que naturalmente é formado em vales no final de declives, mesmo em locais com pequenas declividades, e, também, não considera a formação de voçorocas (RENARD *et al.*, 2011).

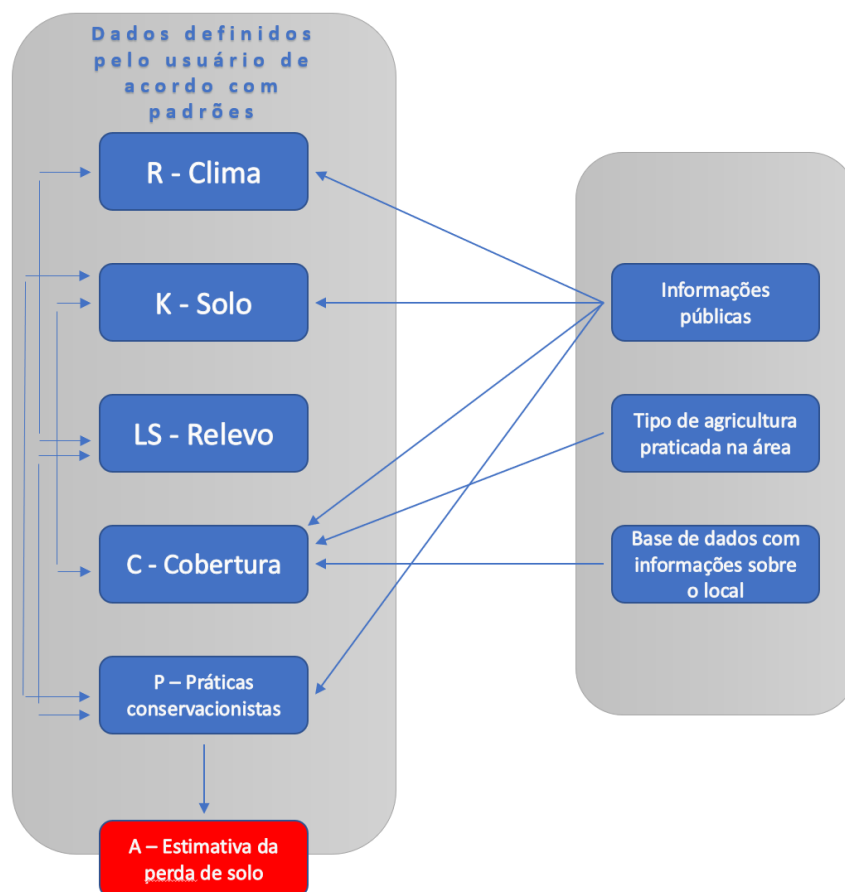
Tabela 12 – Principais métodos para obtenção dos fatores utilizados na RUSLE e USLE.

PARÂMETRO	MÉTODOS	REFERÊNCIAS
R	Usar valores de índices erosivos para todas as chuvas em um ano	Wischmeier and Smith, 1978
	Usar a média mensal e anual de precipitação	Renard and Fremund, 1994
	Usar um modelo de regressão linear baseado na precipitação anual	Millward and Mersey, 1999
	Usar um modelo de regressão baseado na precipitação anual e dados de altitude e elevação	Mikhailova <i>et al.</i> , 1997
	Usar método geoestatísticos como a Krigagem	Goovaerts, 1999
	Utilizar métodos e técnicas de simulação como a sequência Gaussiana	Wang <i>et al.</i> , 2002
K	Utilizar modelos experimentais baseado nas propriedades do solo (composição de areia, silte e argila; matéria orgânica, estrutura e permeabilidade)	Wischmeier and Smith, 1978
	Usar equações de regressão baseados nas propriedades do solo	Angima <i>et al.</i> , 2003
	Usar os valores de K publicados pela USDA	Soil Survey Staff, 1997
	Basear-se no tamanho das partículas do solo	Romken, 1983
	Usar métodos geoestatísticos como a simulação sequencial e a sequência gaussiana.	Parysow <i>et al.</i> , 2003, Wang <i>et al.</i> , 2001
LS	Estimar a partir de dados obtidos em campo	Wischmeier and Smith, 1978
	Calcular com base em modelos digitais de elevação do terreno	Hickey, 2000; Van Remortel <i>et al.</i> , 2001
C	Utilizar dados individuais da taxa de perda do solo e da ação da chuva no transporte de sedimentos	Renard <i>et al.</i> , 1997
	Combinação de valores encontrado por meio de modelos empíricos e imagens de satélites	Millward and Mersey, 1999
	A partir de classificação supervisionada de imagens de satélite	Reusing <i>et al.</i> , 2000
	Técnicas geoestatísticas	Wang <i>et al.</i> , 2002b
	Índice Greenness	Ma <i>et al.</i> , 2003
P	Dados experimentais	Renard <i>et al.</i> , 1997

Fonte: Adaptado de Lu *et al.* (2004)

Após a publicação dos manuais USDA's Agriculture Handbook No. 282 (WISCHMEIER e SMITH, 1965) e USDA's Agriculture Handbook No. 537 (AH537) (WISCHMEIER e SMITH, 1978) com as técnicas necessárias para a obtenção de cada um dos fatores utilizados na equação, em 1985, cientistas e engenheiros do Departamento de Engenharia e Agricultura dos Estados Unidos desenvolveram uma nova forma de aplicação da USLE, que ficou mundialmente conhecida como RUSLE (RENARD *et al.*, 1997). O RUSLE é uma informação melhorada da equação anterior apresentada por Wischmeier e Smith com o intuito de utilizar adventos computacionais para facilitar o cálculo dos fatores assim como fornecer novas possibilidades para os pesquisadores. A principal mudança ocorreu com relação ao fator C que até então era basicamente voltado ao uso agrícola, sendo fornecidos novas possibilidades de estudos voltados para outras áreas (RENARD *et al.*, 2011). A Figura 13 a seguir apresenta as informações necessárias para a entrada de dados e o funcionamento dos algoritmos do RUSLE.

Figura 13 - Diagrama de aplicação dos parâmetros da USLE



2.5.2 Parâmetros e informações de entrada para aplicação dos modelos

Os parâmetros normalmente utilizados para fornecer os dados iniciais possibilitando a aplicação dos diversos modelos de predição são obtidos por meio de ensaios de campo e laboratório, sistemas de controle em campo, cartas topográficas e geológicas, interpretação de fotos de satélites e modelos digitais e por observações gerais em campo (FUREGATTI, 2012).

Muitos dos ensaios de campo e de laboratórios são corriqueiros em estudos geotécnicos, sendo considerado como de domínio e conhecimento comum dentro da comunidade que estuda as informações geotécnicas do ambiente através da determinação dos parâmetros físicos. Alguns dos dados necessários são obtidos apenas como ensaios específicos para determinado fim que demandam um algum conhecimento técnico, como o ensaio de simulador de chuvas, ensaio de resistência do solo à penetração ou ensaio de infiltração de duplo anel (FUREGATTI, 2012).

De acordo com Furegatti (2012), existem duas formas principais de entrada de dados nos modelos adotados: (1) digitação dos atributos por meio de fichas ou tabelas que constituem um banco de dados – sendo esta forma pouco utilizado atualmente com a advento da utilização dos SIG como ferramentas de apoio – e (2) extração de dados a partir de arquivos rasters ou de sistema de CAD, sendo nesse tipo de arquivo encontrado as cartas topográficas, imagens de satélites, cartas de declividades, modelos digitais de elevação do terreno, uso do solo e qualquer outra informação pertinente ao estudo.

2.5.3 Os SIG e a metodologia de avaliação de critério múltiplos

De acordo com Eastman (1996), uma das mais importantes aplicações de um SIG é a apresentação e análise de dados de suporte na tomada de decisões em relação à avaliação de processos e alterações ambientais. Uma decisão pode ser definida como uma escolha entre alternativas, onde as alternativas podem ser diferentes ações, locais, objetos e características. Por exemplo, um grupo de gestão municipal precisa decidir qual o melhor local para a implementação de um aterro sanitário ou mesmo o melhor terreno para a construção de uma quadra de esporte ou centro de saúde. Dessa forma, o uso de ferramentas matemáticas e gráficas com a

aplicação de uma avaliação criterioso pode facilitar na tomada de decisão quanto à diversos casos específicos.

Racionalmente, decisões são baseadas em um ou mais critérios - que são os atributos mensuráveis das alternativas consideradas para a solução da decisão a ser tomada. Em alguns casos, é possível avaliar um único critério para a solução de um problema, porém, é mais frequente a necessidade da avaliação de uma variedade de fatores. Por exemplo, na locação de uma nova área para a instalação de um aterro são necessários avaliar a distância até pontos coletores, proximidade de rodovias, uso e ocupação dos solos e outros. Nesse caso, é necessário conduzir um estudo conhecido como avaliação de critério múltiplos (MCE – “*multi criteria evaluation*”), onde a solução do problema ambiental em questão só é possível com a análise de diversos fatores.

Eastman (1995) afirma que nos SIG, a avaliação de critério múltiplo tem sido adotada de duas formas. O primeiro transforma os critérios avaliados em uma lógica Boleana (conhecido como lógica do verdadeiro e falso) que trata o critério como um sistema binário simples onde a informação pertence (verdadeiro) ou não (falso) ao critério avaliado. Essa primeira forma é utilizada como restrição uma vez que serve para delimitar os locais que devem ou não serem consideradas para o estudo. Essas restrições podem ser combinadas com a lógica de interseção (E) ou união (OU). É possível aplicar esse procedimento utilizando as ferramentas de vetores e raster de algum programa de SIG com o objetivo de eliminar as áreas restritivas do estudo conduzido.

A segunda forma de avaliação mais adotada para o MCE é considerar os critérios como variáveis contínuas, ao invés de utilizar apenas uma decisão de verdadeiro e falso. Dessa forma, os critérios são chamados de fatores e expressam graus variáveis de susceptibilidade para a decisão em consideração. Assim, um critério pode receber graus de importância de acordo com uma escala numérica padronizada. Por exemplo, na instalação de um aterro sanitário o fator “distância de centros urbanos” pode ser considerado quanto aos custos de transporte do local de coleta até o descarte final.

A padronização dos fatores é feita utilizando a combinação de média de pesos ponderadas – sendo cada fator multiplicado por um peso, que pode ser obtido através

de outros estudos ou avaliação de técnicos, sendo o resultado somado para encontrar uma solução na avaliação de critérios múltiplos, chamado de aptidão, conforme Equação 2.

$$\text{Aptidão} = \sum w_i X_i * \pi C_j \quad \text{Equação 2}$$

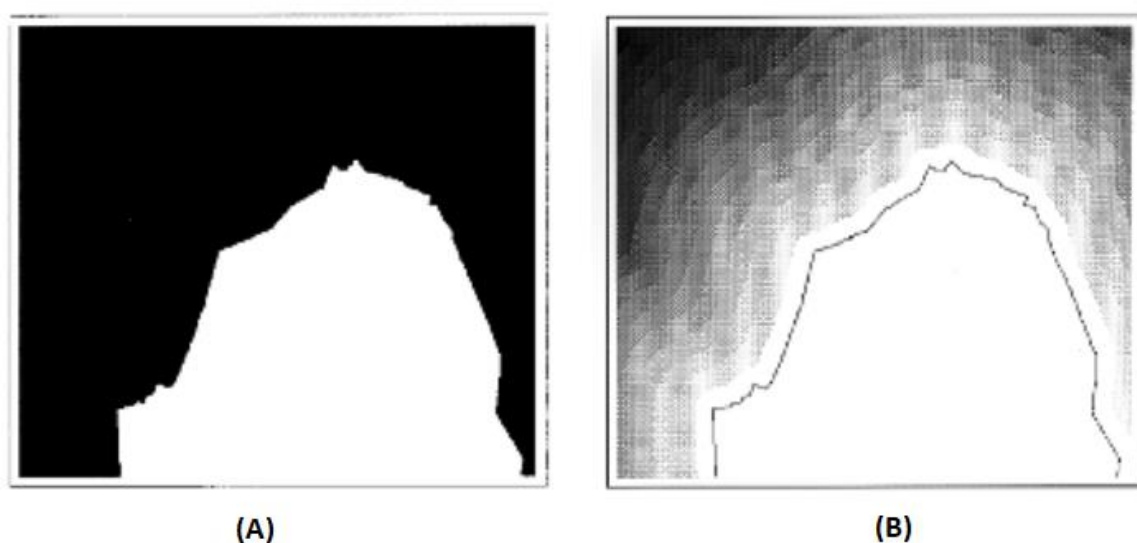
Onde w_i = peso atribuído ao fator i ;

X_i = pontuação de critério do fator i (de acordo com a escala adotada)

C_j = restrição j

A Figura 14 a seguir exemplifica a diferença entre as duas formas de avaliação adotadas para o MCE. De forma simplificada, o objetivo principal é a locação de uma área para a instalação de um aterro sanitário. Em (A) a área em branco é uma área protegida por ser uma reserva natural e área preta não tem qualquer restrição quanto a instalação do aterro, de acordo com a lógica Boleana, porém, em (B) é feita a consideração que, quanto mais afastado da área da reserva ambiental melhor, pois não ocorrerá interferências do aterro com o ambiente natural da reserva. Sendo assim, é ponderado o fator distância, sendo dado um peso de importância conforme afasta-se da área, demonstrado pelo escurecimento da região.

Figura 14 - Exemplo de avaliação de critério múltiplos. (A) Lógica Boleana e (B) Ponderamento dos Fatores



Fonte: Eastman (1996).

A determinação de peso de cada fator é feita utilizando a comparação par a par, conforme recomendação de Eastman (1995), onde cada fator é avaliado de acordo com sua importância relativa em comparação com todos os outros fatores usando uma escalada recíproca de 9 pontos. Por exemplo, se o valor 9 é considerado como o mais importante, o seu inverso 1/9 é atribuído como o menos importante. Isso leva a criação de uma matriz de n por n fatores a serem avaliados e comparados. Nas Tabelas 13 e 14 a seguir é exemplificado o funcionamento do sistema com alguns fatores aleatórios para ilustração considerando a elaboração de um mapeamento de locais com probabilidade de ocorrência de processos erosivos. Importante notar que o processo é iterativo e consistente com o conhecimento prévio sobre o assunto para a atribuição dos valores de acordo com o escopo do estudo.

Tabela 13 – Matriz de comparação par a par

	1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
	extremo	muito	forte	moderado	igual	moderado	forte	muito	extremo
	Menos Importante					Mais Importante			

	Declividade	Densidade de drenagem	Fator K	Cobertura do Solo	Uso do Solo
Declividade	1.00	7.00	3.00	2.00	5.00
Densidade de drenagem	0.14	1.00	0.33	0.33	0.20
Fator K	0.33	3.00	1.00	0.25	0.33
Cobertura do Solo	0.50	3.00	4.00	1.00	2.00
Uso do Solo	0.20	5.00	3.00	0.50	1.00
Soma	2.18	19.00	11.33	4.08	8.53

Fonte: Cartwright (2018)

A leitura da Tabela 13 deve ser feita da seguinte forma: a densidade de drenagem é moderadamente menos importante que o fator K; e a cobertura do solo é moderadamente mais importante que a densidade de drenagem com relação à probabilidade de ocorrência de processos erosivos. O mesmo deve ser aplicado para os outros fatores conforme a escala de comparação.

Conforme Tabela 14, o peso derivado é obtido para o cálculo da aptidão com base em uma média entre cada coluna, sendo feita a partir da primeira coluna onde é somado cada um dos fatores para posterior divisão pelo valor somado. Em seguida deve-se fazer o mesmo procedimento para cada coluna, anotando os respectivos

valores em uma nova matriz. Ao final, é feito uma média simples da soma de cada linha para obtenção do peso de cada fator que será utilizado na avaliação da tomada de decisão.

Tabela 14 – Matriz de Padronização dos pesos

	Declividade	Densidade de drenagem	Fator K	Cobertura do Solo	Uso do Solo	Peso
Declividade	0.46	0.37	0.26	0.49	0.59	43.40%
Densidade drenagem	0.07	0.05	0.03	0.08	0.02	5.10%
Fator K	0.15	0.16	0.09	0.06	0.04	10.00%
Cobertura do Solo	0.23	0.16	0.35	0.24	0.23	24.40%
Uso do Solo	0.09	0.26	0.26	0.12	0.12	17.20%

Fonte: Cartwright (2018)

2.5.4 O SIG como ferramenta de apoio na aplicação dos modelos

Utilizar métodos e modelos convencionais para determinar a probabilidade e o risco de erosão de determinado local demanda um grande investimento de tempo de recursos financeiros. A integração de modelos existentes, dados de campo e dados obtidos por meio de sensoriamento remoto em um ambiente SIG aparenta ser uma possível solução para a praticidade de estudos futuros. O modelo digital de elevação (MDE) é um dos dados essenciais de entrada em um banco de dados que permite trabalhar com a modelagem da erosão no solo, sendo facilmente manipulado em um ambiente de SIG. Além disso, ao dividir grandes áreas em pequenas células é possível atribuir pontos espacialmente identificados com características únicas e específicas de cada local uma vez que os processos erosivos têm como características variar espacialmente (GANASRI; RAMESH, 2016).

A seguir, serão apresentados diversos estudos onde diversos autores utilizaram métodos de predição de locais com potencialidade de ocorrência de processos erosivos utilizando diversas ferramentas computacionais de SIG para a criação de banco dados com intuito de facilitar a operação das centenas de dados necessários para a aplicação dos diversos modelos.

No trabalho de Lu *et al.* (2004), foi aplicado o modelo Revisado da Equação Universal de Perda do Solo (RUSLE) para mapear os riscos de processos erosivos na bacia Amazônica do Brasil. Foi utilizado um ambiente SIG onde foi criado um banco de dados contendo as informações necessárias para cada fator encontrado na RUSLE. O fator K (erodibilidade) foi determinado com base em dados de campo e mapas de solo, os fatores topográficos LS foram obtidos com base em um modelo digital de elevação do terreno, o uso e gestão do solo C foi encontrado por meio de imagens baseada na vegetação e cobertura por meio de técnicas de interpolação. Um dos diferenciais do trabalho foi não adotar os fatores R, de erosividade, e P, de práticas de conservação, devido à ausência de dados, facilitando, assim os cálculos. Por fim, foi gerado um mapa com cinco diferentes classes de probabilidade à ocorrência de erosão em determinado local e depois pareado com um mapa de uso e ocupação do solo para a mesma região buscando identificar a relação entre o tipo de uso e cobertura do local com o grau de severidade do processo erosivo. Encontrou-se que os locais com maior cobertura arbórea são as áreas com menor risco e as áreas de agropastoril foram as áreas com a maior problemática em relação à ocorrência de processos erosivos.

No trabalho de Fujaco *et al.* (2016), foi desenvolvida uma ferramenta de GIS para facilitar a aplicação da equação da USLE para a predição de processos erosivos. Foi desenvolvido um script com base em ferramentas computacionais PYTHON e ModelBuilder que permitiu a criação de software para calcular o fator de perda do solo (A). O script foi desenvolvido como complemento de um software maior – ArcGIS – e chamado de “USLE Paracatu Watershed” e foi validado e provado sua eficácia através da estimativa de processos erosivos em três diferentes bacias com um tempo de processamento menor do que meio segundo para cada km² da área avaliada. O operador precisa apenas entrar com os dados referentes aos parâmetros da USLE que o software irá calcular os resultados referentes à perda de solo gerando um mapa final com as informações em tonelada por hectare por ano, podendo este mapa ser comparado com o mapa de uso e ocupação do solo. Importante ressaltar que o script foi criado com o intuito de ser facilmente utilizado por outros usuários.

No estudo de Beskow *et al.* (2009), foi conduzido uma avaliação dos processos erosivos na bacia hidrográfica do Rio Grande, localizado em Minas Gerais, que é considerado uma região com enorme potencial hídrico e de grande importância

econômica. O objetivo do trabalho foi de aplicar a Equação Universal de Perda do Solo (USLE) utilizando o programa GIS PCRaster para estimar o potencial de perda de solo nesta bacia próximo à hidrelétrica de Camargos, permitindo, assim, a identificação de áreas susceptíveis à formação de erosão e calcular a taxa de carreamento de sedimentos buscando adotar medidas de gestão para essa bacia de acordo com as necessidades do local. Para a validação da metodologia empregada, foi feito um ensaio de acordo com a Taxa de Carreamento de Sedimentos (SDR) que é baseada no transporte de sedimentos no local. Concluiu-se que mais da metade da bacia possui problemas com erosão onde a perda de solo é maior que a taxa de renovação do mesmo, indicando a severidade do problema na região.

Em Medeiros *et al.* (2016), foi feito um estudo aplicando a Equação Universal de Perda do Solo (USLE) com o intuito de gerar um mapa atualizado e recente – de forma genérica – da perda de solo para todo o estado de São Paulo utilizando uma base de dados com resolução de 30 metros. O trabalho utilizou um banco de dados já existente em SIG com diversas informações que foram compiladas para a criação do mapa final de perda de solo para todo o estado. As informações utilizadas foram: (1) Vetor com o mapa dos solos do estado em uma escala 1:500.000; (2) Uso e ocupação do solo no formato raster de 2005 na escala 1:100.000 e (3) Modelo digital de elevação do terreno do projeto TOPODATA de 2008 com resolução espacial de 30 m. O autor ressalta que o resultado encontrado é genérico e serve apenas como referência uma vez que a área avaliada é extremamente grande e a USLE não foi criada com esse intuito de uso. Como resultado, os autores encontraram que muitas áreas de estado estão sofrendo danos críticos devido à alta taxa de perda de solo quando comparada a taxa de renovação do mesmo, principalmente em locais com plantio de cana de açúcar e uso agropastoril. Em mais de 59% da área do estado a taxa de perda de solo foi maior que a taxa tolerante limite de 12 Mg por hectare por ano.

No trabalho de Eastman *et al.* (1995), foi apresentado uma nova metodologia que utiliza a ideia de avaliação multicritério onde diversos parâmetros são ponderados um frente ao outro conforme sua importância. Com o advento do uso do SIG, a aplicação desse tipo de decisão foi facilitado e difundiu-se ainda mais. Neste trabalho os autores apresentaram uma forma de avaliação dos processos erosivos considerando uma combinação de pesos ponderados com a aplicação do Processo

Analítico Hierárquico (AHP) para cada um dos fatores analisados, variando entre menos importante e mais importante entre os diversos parâmetros utilizados nas mais diversas metodologias.

No estudo de Martini *et al.* (2006), foi adotado um conjunto de procedimentos na avaliação de susceptibilidade a processos erosivos e movimentos de massa na área de influência direta da usina hidrelétrica Quebra-queixo no rio Chapecó em Santa Catarina. Para tanto, utilizou-se recursos de decisão multicritério juntamente com um sistema SIG. Dentre os fatores adotados para compor a decisão multicritério com base na ponderação de pesos pelo método AHP dividiu-se em 11 subgrupos as informações sobre o relevo, solo e cobertura vegetal, tendo, como exemplo: geomorfologia, declividade, comprimento de pendentes, orientação de vertentes, drenagem, profundidade, textura, tipo de cobertura e densidade de cobertura. Cada um desses fatores foi então escalonado e ponderado conforme metodologia empregada pelos autores e descrito em seu trabalho, utilizando-se do método de combinação linear ponderada. Importante notar que a escala numérica utilizada para ordenar as características indicadores, foi obtida por meio de consenso técnico e o peso calculado com base no método demonstrado por Eastman *et al.* (1995). Todo o processo foi feito utilizando o SIG Idrisi onde cada fator tomou a forma de um plano de informação, facilitando a comparação entre os onze subgrupos avaliados na ponderação. Por fim, os autores criaram um mapa com os principais locais com probabilidade de ocorrência de erosão e foram à campo para verificar a veracidade do método, verificando que muito dos locais apontados como áreas problemáticas já possuíam feições erosivas em campo.

No trabalho de Graça *et al.* (2015), foi feito um estudo para analisar o comportamento multitemporal entre os anos de 1985, 1993, 2003 e 2013 da perda de solo por erosão hídrica laminar na bacia hidrográfica do rio Mourao, localizada na região centro-ocidental do Estado do Paraná. A predição baseou-se na aplicação da USLE, com integração dos dados e estimativas utilizando um ambiente de SIG visando facilitar a criação do banco de dados e posterior comparação entre os dados. Os dados de entrada foram semelhantes ao de outros trabalhos com fatores relacionados ao solo, clima, relevo, cobertura e uso do local. A erosividade do local foi considerada elevada com base na chuva anual; os solos apresentaram um média erodibilidade com exceção do Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho; a topografia

do terreno atingiu valores elevados em alguns locais, porém, em geral, o local possui topografia plana. O resultado mostrou que a região possui um Potencial Natural à Erosão Laminar predominante baixo com exceções em alguns pontos críticos e, com relação à avaliação multitemporal, percebeu-se pouca alteração entre os anos, intensificando-se em alguns setores com a mudança do uso e ocupação do local.

No estudo conduzido por Ganasri e Ramesh (2016), foi utilizado uma metodologia de modelagem utilizando um ambiente SIG para avaliar a erosão do solo na região da bacia do Nethravathi no sudoeste da Índia utilizando a forma revisada da Equação Universal de Perda do Solo (RUSLE). O principal intuito do trabalho foi mapear áreas propícias à ocorrência de processos erosivos para fornecer à administração local meios de combater esse problema diretamente no local que demanda maior atenção. Os parâmetros do modelo para a aplicação do RUSLE foram estimados utilizando sensoriamento remoto e a zona de probabilidade de ocorrência à erosão foi determinado com auxílio do SIG ArcGIS. O diferencial deste trabalho está na forma como o mapa de probabilidade e risco à processos erosivos foi criado, onde foi aplicado um índice de pesos ponderados – conforme metodologia desenvolvida pelos autores – para cada um dos parâmetros analisados (uso e ocupação do solo, tipo de solos, declividades e precipitação) para posterior sobreposição dos layers, relacionando o mapa encontrado por meio da metodologia RUSLE com cada um dos planos de informação ponderados, criando o mapa final de zonas de probabilidade de ocorrência de processos erosivos.

Na publicação de Oliveira *et al.* (2009), utilizou-se do método analítico hierárquico (AHP) para a obtenção da Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE) de bacias hidrográficas baseado na metodologia proposta por Crepani. Os parâmetros utilizados foram geologia, geomorfologia, pedologia e vegetação, sendo estes parâmetros ainda separados em mais 13 classes a terem sua valoração – de acordo com a metodologia adotada por Crepani – normalizada e ponderada com base no princípio da metodologia AHP, permitindo a adequação dos fatores da VNE conforme as peculiaridades de cada local, pois define a hierarquia dos fatores que ocasionam a erosão hídrica na área de estudo. As classes foram convertidas em uma escala de zero a um por meio de lógica fuzzy, em seguida, comparados e hierarquizados na plataforma SIG SPRING, conforme a influência de cada classe na ocorrência de processos erosivos. Como resultado verificou-se que o método AHP classificou uma

quantidade maior de área com maior probabilidade à ocorrência de processos erosivos quando comparado ao método do VNE, podendo considerar o método AHP como uma forma de melhorar o resultado com uma subdivisão maior dos parâmetros em classes menores com uma comparação pareada entre cada uma delas.

No trabalho de Akugun e Turk (2011), foi utilizado uma metodologia com base em regressão linear e estatísticas para criar um mapa de susceptibilidade a erosão para a região de Ayvalik em Balıkesir na Turquia. Os parâmetros utilizados foram: grau de resistência das rochas (devido a Turquia ser uma região com relevo montanhoso), declividade, densidade estrutural do solo, densidade de drenagem, cobertura do solo, taxa de carreamento e curvatura do terreno. Importante ressaltar que muito dos parâmetros utilizados pelos autores são necessários devido às características da região e do local, ressaltando a diversidade da aplicação das metodologias, muitas vezes não permitindo a aplicação dessas em locais com características diferentes. Os parâmetros foram processados utilizando o SIG IDRISI por meio de uma análise de regressão logística para relacionar variáveis de predição de ocorrência ou não de processos erosivos do tipo voçorocas previamente mapeados no local e georreferenciados, utilizando essa relação para produzir um mapa de probabilidade de possíveis futuros locais com ocorrência de processos erosivos. Os resultados mostraram que a densidade estrutural do solo, resistência das rochas e densidade de drenagem são as variáveis mais importantes com relação aos processos erosivos. As outras variáveis foram consideradas secundárias, para a região, conforme resultados. A validade do método foi feita por meio de comparação estatísticas, sugerindo uma boa acurácia do método.

No estudo de Noori *et al.* (2016), foram utilizados os métodos Modified Pacific Southwest Inter Agency Committee (MPSIAC) e Erosion Potential Method (EPM) com o intuito de determinar a eficiência destes métodos em estimar a intensidade dos processos erosivos e o carreamento de sedimentos – no curto e longo prazo – em duas sub bacias hidrográficas na região do Dez no Irã. A processo metodológico para ambos os métodos é baseado na adoção de pesos para cada um dos fatores analisados (geologia, solo, clima, escoamento superficial, topografia, cobertura do solo, uso do solo e erosão de encostas) de acordo com sua intensidade e importância na formação de processos erosivos, seguindo as indicações dos autores. Esses fatores foram encontrados utilizando sensoriamento remoto e sistemas de

informações geográficas e foram criados mapas em camadas de cada um deles com seu respectivo peso. Como resultados, os autores encontraram que mais da metade da área de estudo é altamente susceptível ao aparecimento de processos erosivos devido principalmente devido às formações geológicas e cobertura do solo. Entretanto, a intenção do trabalho era verificar se o valor encontrado de carreamento de sedimento durante épocas chuvosas correspondia com o valor previsto pelos modelos, sendo feita uma comparação com valores encontrados. Foi verificado que o método EPM superestima o valor de sedimento e o modelo MPSIAC forneceu dados variados e não consistentes para os períodos analisados.

Em outro trabalho de Noori *et al.* (2018), também foram utilizados o sensoriamento remoto e a aplicação do SIG para facilitar o uso da metodologia empregada pelo MPSIAC, buscando avaliar a intensidade dos processos erosivos em uma bacia do rio Dez, no Irã, por meio da quantificação do carreamento de sedimentos. Os autores encontraram que a área pode ser separada em três categorias de severidade com relação a probabilidade de ocorrência de processos erosivos, sendo a área central e ao sul com maiores problemas principalmente devido ao tipo de formação geológica e o tipo de cobertura, e a parte sul com menores problemas devido a cobertura vegetal nativa ainda presente no local. Foi determinado, também, a ordem de importância dos fatores utilizados no estudo, sendo eles do mais importante para o menos: topografia, uso do solo, erosão já presente, clima, cobertura do solo, tipo do solo, escoamento superficial e geologia superficial.

No trabalho de Wu e Wang (2007), foi criada uma metodologia para estabelecer um modelo analítico de avaliação de risco à erosão, devido à ação hídrica, integrando o uso de sensoriamento remoto, programas de georreferenciamento, o método analítico hierárquico, e técnicas de modelagem para avaliar a probabilidade de ocorrência de erosão na província de Shaanxi, China. Baseado em pesquisas de campo e dados disponíveis, foram identificados nove fatores considerados no estudo para a devida ponderação: tipo de solo, intensidade da chuva, forma do terreno, densidade de ravinas, declividades, cobertura vegetal, área de mineração, nível do lençol freático, conservação do solo e tipos de uso. Foi então criado um mapa temático para cada fator considerando os riscos de causar processos erosivos, sendo então ponderados conforme a técnica AHP. Então, o modelo foi aplicado para criar um mapa de predição com relação ao desenvolvimento

de processos erosivos, sendo uma possível forma de avaliação do risco para determinada área podendo ser utilizado para a gestão de governos locais. Importante ressaltar o diagrama criado pelos autores facilitando a aplicação do método.

No estudo conduzido por Conoscent *et al.* (2014), foi utilizado a aplicação de uma metodologia com análises estatísticas multivariável utilizando um ambiente SIG para caracterizar a susceptibilidade à ocorrência de voçorocas. A área de estudo onde a metodologia foi aplicada possui 9,5 km² e está localizada na região central da Sicília, Itália, onde a atividade agrícola é limitada devido à presença de diversos processos erosivos. Primeiramente, como forma de validação e controle do método, foi feito um mapeamento em campo de mais de 260 voçorocas na região de estudo, georreferenciado e importado para o banco de dados dentro do SIG. Foi também utilizado – a partir de mapas temáticos de 5 metros já disponíveis para a região – 27 diferentes atributos ambientais que conhecidamente interferem na formação de processos erosivos, como o tipo de solo, uso do solo, cobertura, geologia e relevo. Cada um desses atributos, ao ser inserido no banco de dados, foi pareado com o mapa de voçorocas locado em campo criando uma relação entre a presença ou não de processos erosivos em cada célula - de acordo com o parâmetro avaliado. A relação funcional entre o parâmetro e a presença ou não de voçorocas foi posteriormente analisada por meio regressão logística para calcular a probabilidade de ocorrência de voçorocas em cada célula mapeada de acordo com o parâmetro avaliado. Dessa forma, cada informação presente nos parâmetros foi mapeada com referência às informações reais do local, possibilitando a criação de mapas de riscos com alta precisão seguindo a metodologia descrita pelos autores.

Por fim, no trabalho feito por Pandey *et al.* (2016) foram analisados 50 diferentes modelos físicos de predição de processos erosivos considerando que esses modelos variam significativamente em termos de suas capacidades e complexidades, requisitos de dados de entrada, representação dos processos, aplicabilidade, variação espacial e temporal e os tipos de resultados encontrados. Nesse mesmo estudo, verificou-se que diversas literaturas sobre o assunto sugerem o uso dos modelos SWAT, WEPP, AGNPS, ANSWERS e SHETRAN, sendo estes mais eficientes para o cálculo de processos erosivos superficiais. Esses modelos físicos são baseados em equações físicas fundamentais e suas soluções descrevem o fluxo de sedimentos em uma bacia, sendo que para esses modelos descreverem

os mecanismos essenciais que governam processos erosivos é necessário considerar características físicas como topografia, geologia, uso do solo, clima, vegetação e características do sistema de drenagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

- Dados cartográficos:

- Base cartográfica vetorial em cartas planialtimétricas do IBGE para o município de Palmeiras d'Oeste – SP, SF-22-X-A-I-3, na escala 1:50.000 em Sistemas de Coordenadas Geográficas DATUM - WGS84 (IBGE, 2018);
- Mapas temáticos de litologia, geologia e pedologia com base no banco de dados do DataGEO (OHATA, 2015) e seus metadados;
- Mapas temáticos de feições erosivas do relatório SigRH (2018).

- Dados de imagens:

- Imagem CBERS 4 do sensor MUX com resolução de 20 metros, bandas 5, 6 e 7, órbita ponto 160/123 com passagem em 08/12/2017 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2017);
- Imagem de Modelo Digital de Elevação do projeto TOPODATA (VALERIANO, 2004) em resolução de 30,00 metros e ALOS (JAXA, 2008) em resolução de 12,50 metros;
- Imagens Google Earth® para consulta de processos erosivos por análise visual;
- Fotos providas de visita à campo

- Softwares:

- SPRING 5.5.2 (CAMARA *et al*, 1996)
- SAGA GIS – Source Forge (CONRAD *et al.*, 2007)
- netErosividade – SP (MOREIRA *et al.*, 2006)
- Google Earth Pro e Maps®

3.1 Caracterização geral da área de estudo

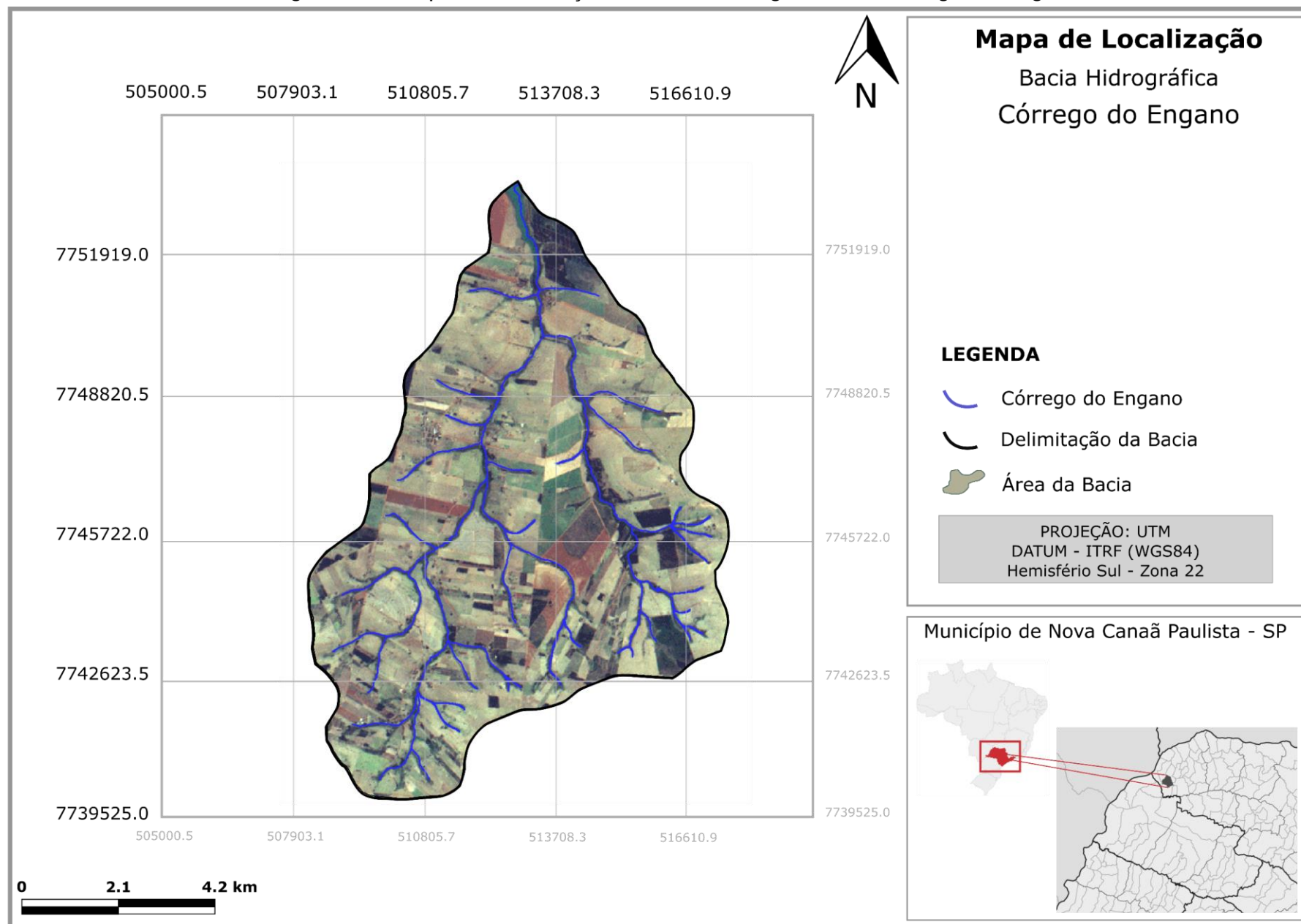
A Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, possui 72,69 km² e está localizada no município de Nova Canaã Paulista, na região noroeste do interior do Estado de São Paulo, entre as coordenadas planas UTM X1: 50500.4930; X2: 519514.8375 e Y1: 7739524.8547; Y2: 7755018.1487 na Zona 22, Sul (Figura 15). A carta topográfica correspondente à região é a de Palmeiras D'Oeste, São Paulo, sob número SF-22-X-A-I-3. Esta área encontra-se inteiramente dentro da Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados (CBH – SJD).

O município de Nova Canaã Paulista possui uma área total de 124,47 km² e uma população de 2.114 pessoas, sendo um dos municípios menos populosos e povoados do estado de São Paulo, com uma densidade de demográfica de 16,99 hab/km². O PIB per capita do município é de R\$ 14.887,24 com um IDHM de 0,715. A economia do município é predominantemente agrária com a pecuária voltada à criação de ruminantes e na agricultura com a plantação intensiva de cana de açúcar. O município limita-se ao Norte com Três Fronteiras, ao Sul com Aparecida D'oeste, a Leste com Palmeira D'oeste e a Oeste com Santa Fé do Sul e sua sede situa-se a 20°37' de Latitude Sul e 50°95' de Longitude Oeste (IBGE, 2018).

3.1.1 Vegetação

De acordo com IBGE (2018), o bioma predominante no município de Nova Canaã Paulista é o cerrado (savana) sendo uma vegetação de origem tropical. E, de acordo com o Mapa Florestal do Município, os tipos de cobertura vegetal são: mata, capoeira, cerrado e reflorestamento onde apenas 1,57% da área do município possui cobertura vegetal que não seja pasto ou outras culturas (SIFESP, 2018)

Figura 15 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano

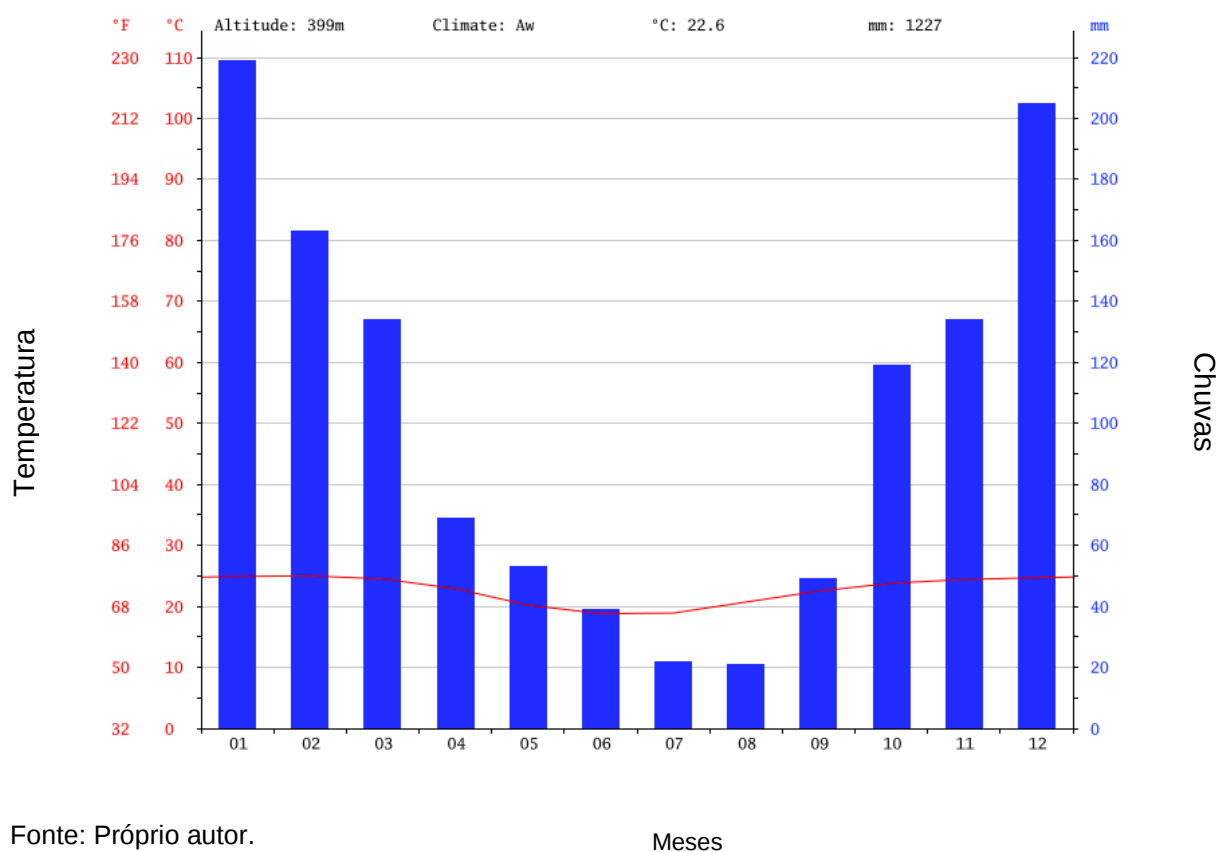


Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen (1936), o município de Nova Canaã Paulista se enquadra na classe Aw e possui um clima Tropical com chuvas concentradas no verão. A temperatura média anual é de 22,6 °C com uma pluviosidade média anual de 1227 mm. A Figura 16 apresenta o climograma com a distribuição das chuvas para a região (IBGE, 2018).

Figura 16 - Distribuição das chuvas para o município de Nova Canaã Paulista



Fonte: Próprio autor.

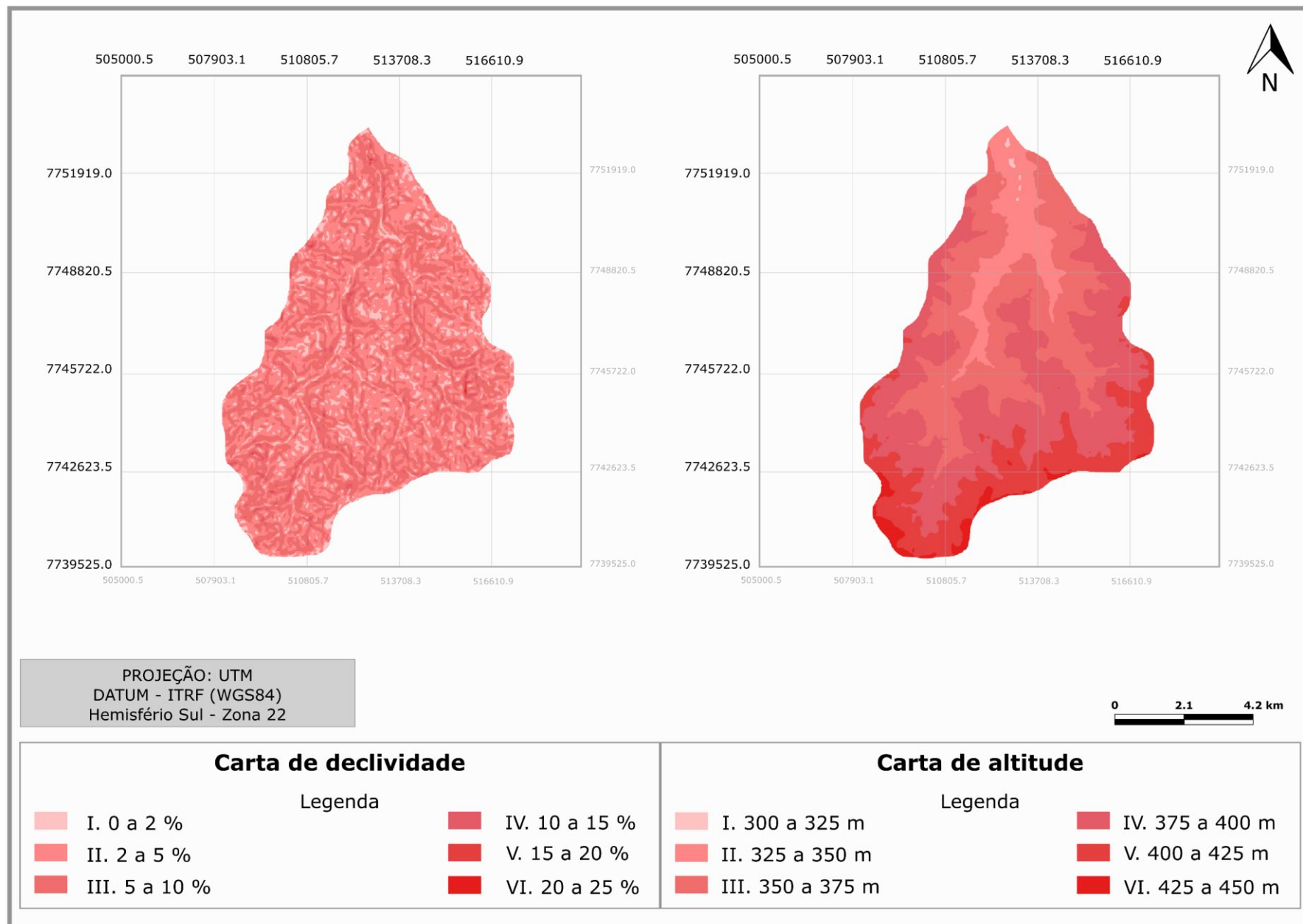
Meses

3.1.3 Relevo e declividade

A carta de declividade do local estudado foi criada com base nas imagens TOPODATA SRTM (INPE, 2008). A principal função desta carta é facilitar o estudo da influência da topografia do terreno na intensidade dos processos erosivos, uma vez que o aparecimento de erosão está diretamente ligado ao comprimento de rampa e à sinuosidade do relevo.

Com base nas classes adotadas por Gomes (2002), elaborou-se a Figura 17 com as informações referentes às declividades e ao relevo da bacia em estudo.

Figura 17 - Cartas de declividade e altitude da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 17, a declividade predominante na região é o de classe II com valores entre 2 a 5% ocupando 35,20 km² ou 48,41% da área da bacia. Em seguida, ocupando 28,22 km² ou 38,81% da área vem a declividade de classe III entre 5 a 10%. Por fim, a classe I ocupando 7,40 km²; classe IV ocupando 1,75 km²; classe V ocupando 0,07 km² e classe VI 0,004 km².

Com relação à altitude a maior área concentra-se entre 375 e 400 metros ocupando 28,02 km² da região. Em seguida, ocupando 22,60 km², encontra-se as altitudes entre 350 e 375; em 12,70 km² da área tem-se altitudes entre 400 e 425 metros; em 7,54 km² da área tem-se altitudes entre 325 e 350 metros; em 1,68 km² da área tem-se altitudes entre 425 e 450 metros e, por fim, em 0,10 km² da área altitudes entre 300 e 325 metros.

3.1.4 Uso e Ocupação

A área onde encontra-se a Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano é predominantemente agrária com grandes áreas de pastagem e plantações de cana-de-açúcar para fornecimento às usinas da região. Com base nessa informação geral inicial, foi feita a classificação supervisionada da área utilizando o software SIG SPRING 5.5.2 e imagens em formato digital obtidas pelo satélite CBERS 4, bandas 5(R), 6(G) e 7(B), órbita ponto 160/123 com passagem em 08/12/2017 (data escolhida devido à melhor visibilidade da área). Definiu-se seis grandes classes para representar a cobertura da área em estudo: vegetação rasteira (pastagem); corpos hídricos; solos expostos (ou solo nu); reservas (ou áreas de proteção); culturas agrícolas e área urbana. Após a definição das classes realizou-se a classificação supervisionada por pixel de MAXVER (máximo verossimilhança) onde são consideradas as informações espectrais de cada pixel. Adotou-se o limiar de aceitação de 100% - indicando que a imagem será classificada sem rejeição – devido à visível uniformidade da área, sendo critério do operador.

A classificação consistiu na criação de um arquivo temático com as classes mencionadas; execução de treinamento com a coleta das amostras por meio de polígonos buscando selecionar no mínimo 5000 pixels para as classes maiores e 2000 pixels para as menores; análise das amostras verificando a confusão e o desempenho médio entre as classes (com limiar de aceitação de 99%); classificação

gerando uma imagem com as cores conforme as classes; pós classificação manual para eliminar ruídos e confusões de pixel nas imagens já classificadas e por fim atribuição da imagem a uma categoria temática para quantificação métrica de cada área, resultando na Figura 18.

De acordo com a Figura 18 a quantificação de cada uma das classes avaliadas quanto ao uso e ocupação do solo na região encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantificação das classes de uso e ocupação

Classe	Área ocupada (km²)	Porcentagem da área (%)
Urbano	0,27	0,37
Solo Exposto	4,05	5,57
Corpos Hídricos	0,32	0,44
Culturas	16,03	22,06
Pastagem e Vegetação Rasteira	44,10	60,69
Mata e Vegetação Ciliar	7,92	10,90
Total	72,66	100

Fonte: Próprio autor.

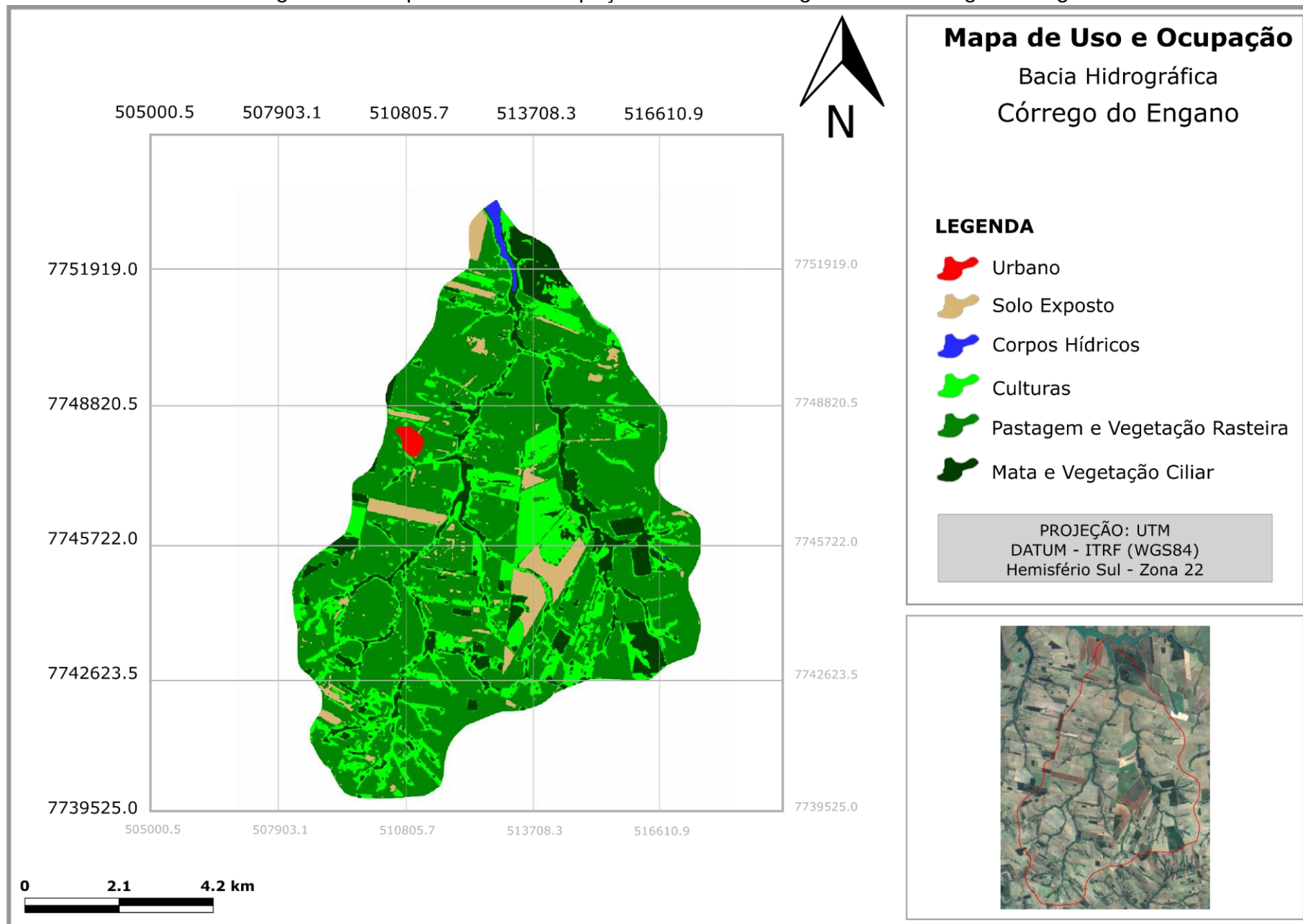
Outra importante informação relativa às características socioeconômicas da bacia em estudo é a divisão dos imóveis rurais presentes dentro da área, conforme Figura 19, a qual possibilita um melhor entendimento da dinâmica econômica da região como base no tamanho das propriedades. De acordo com o Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural - SICAR (2018) a área da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano possui 251 propriedades cadastradas com uma média de 0,21 km² ou 21 ha, sendo a menor delas com 0,00018883 km² e a maior com 2,84 km². De acordo com a definição do INCRA (2018) e sua classificação quanto ao tamanho das propriedades (Tabela 16) a região tem – em média – propriedades de tamanho grande.

Tabela 16 - Divisão de tamanho das propriedades

Classificação da propriedade	Tamanho da Propriedade	
	m²	ha
Minifúndio	< 10000	< 1
Pequena	Entre 10000 e 40000	Entre 1 e 4
Média	Entre 40000 e 150000	Entre 4 e 15
Grande	> 150000	> 15

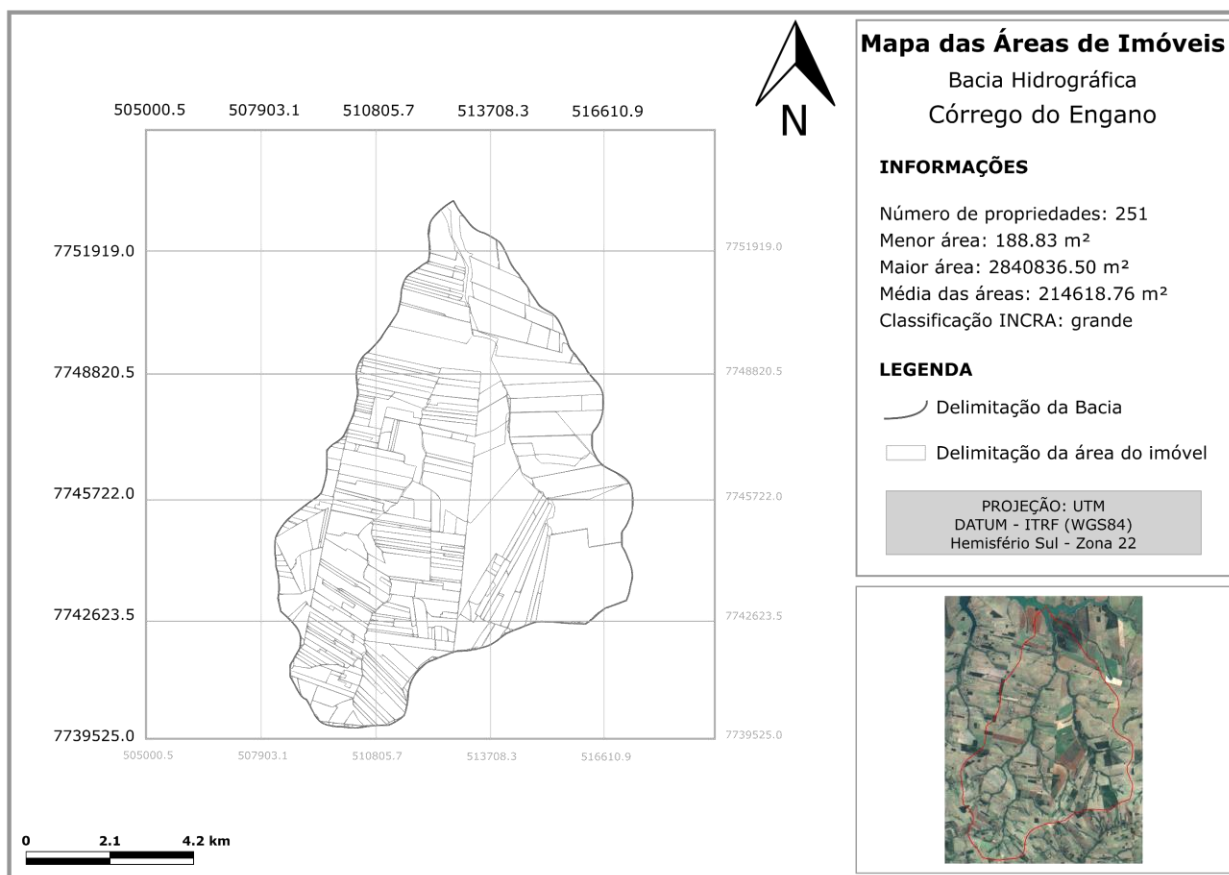
Fonte: INCRA (2018)

Figura 18 - Mapa de Uso e Ocupação da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Divisão das áreas de imóveis rurais da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano



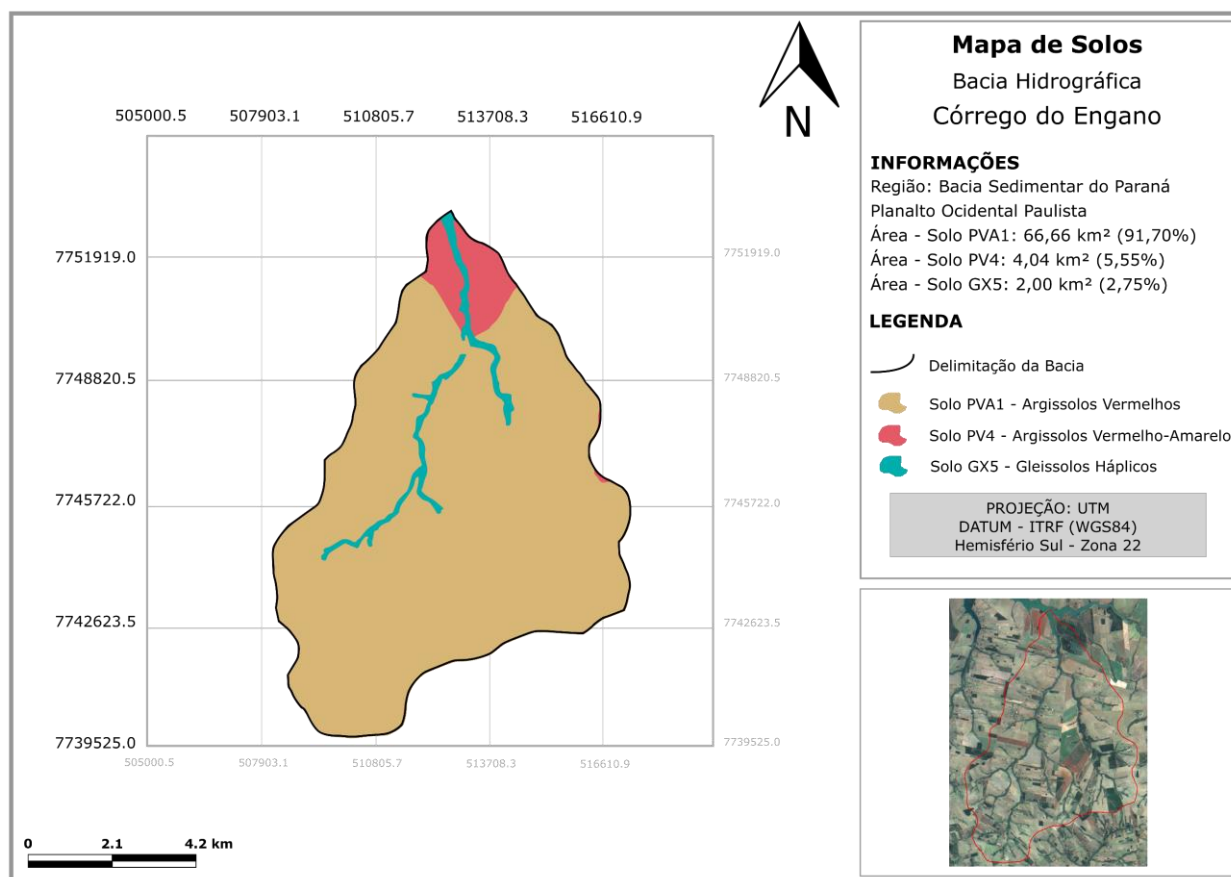
Fonte: Próprio autor.

3.1.5 Geologia, geomorfologia e pedologia

De acordo com Ross e Moroz (1996), na região onde encontra-se a Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, a unidade morfoestrutural presente é a Bacia Sedimentar do Paraná: Planalto Ocidental Paulista na região Centro Ocidental e forma de relevo Dt12. Essa área tem como característica situar-se predominantemente sobre rochas do Grupo Bauru, sendo este constituído por diversas formações areníticas com algumas regiões cimentadas por carbonato de cálcio. O relevo desta morfoescultura é levemente ondulada com predomínio de colinas amplas e baixas, tendo os topos aplanados. A litologia predominante das rochas são os arenitos, siltitos e argilitos

De acordo com Rossi (2017) os principais tipos de solos encontrados na área são os Argissolos Vermelhos (PV4), os Argissolos vermelho-amarelos (PVA1) e os Gleissolos Háplicos (GX5), conforme Figura 20.

Figura 20 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano



Fonte: Próprio autor.

O solo de tipo PV4 corresponde por 5,55% da área e tem como principal característica ser uma associação de argissolos vermelho textura média/argilosa com argissolos vermelho-amarelo de textura arenosa/média, ambos eutróficos e horizonte A moderado com relevo suave ondulado. O solo de tipo PVA1 corresponde por 91,70% da área e tem como principal característica ser um argissolo vermelho-amarelo ou vermelho eutrófico arênico abrupto, de horizonte A superficial moderado ou fraco, de textura arenosa/média e com fase de relevo suave ondulado a ondulado, e o solo de tipo GX5 que corresponde por 2,75% da área sendo um complexo de gleissolo háplico e neossolo flúvico, ambos Distróficos e horizonte A moderado ou proeminente, textura indiscriminada com relevo plano (ROSSI, 2017). Nota-se, ainda, o interessante comportamento do solo GX5 que acompanha o sistema de drenagem da bacia.

3.1.6 Caracterização Morfométrica

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos a serem executados em análises hidrológicas, ambientais e de gestão, e tem como escopo explicar as várias questões relacionadas com o entendimento da atuação e dinâmica do ambiente local e regional. A análise de aspectos morfométricos de bacias hidrográficas, principalmente aspectos relacionados à drenagem, ao relevo e geologia, pode levar ao esclarecimento e entendimento de diversos tópicos associados à dinâmica ambiental local, possibilitando formas de solução para problemas locais (SILVA, 2003).

A região da bacia hidrográfica tem influência sobre o volume de água produzida com o deflúvio. A geologia e o relevo, por outro lado, atuam sobre a contribuição, ou sobre o regime desta produção de água, a taxa de carreamento de sedimentos e a infiltração das águas das chuvas, que expressam estreita correlação com a litologia, estrutura geológica e formação superficial dos elementos que compõem a superfície terrestre. A forma e a extensão dos canais (padrão de drenagem) afetam a quantidade de sedimentos, bem como a taxa do deflúvio. Sendo que, muitas destas características físicas da bacia hidrográfica, por sua vez, são em grande parte controladas ou influenciadas pela sua estrutura morfoestrutural e geológica (SAIS; BELI, 2012).

A bacia hidrográfica em estudo encontra-se dentro de uma área maior denominada de UGHRI 18 ou Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados no Noroeste do estado de São Paulo. A delimitação da área de estudo foi feita com base nas informações de orientações das vertentes criadas por meio de Modelos Numéricos do Terreno retirado de imagens SRTM do TOPODATA/INPE, com resolução de 30 metros. E a rede de drenagem através de vetores disponibilizados pelo IBGE.

A caracterização da bacia foi feita com base em extensa literatura sobre o assunto (VILLELA; MATTOS, 1975; TONELLO *et al.*, 2006; ANDRADE *et al.*, 2009; ALCARAZ *et al.*, 2009; SAIS e BELI, 2012) de acordo com os parâmetros da Tabela 17.

Tabela 17 - Principais características morfométricas de uma Bacia Hidrográfica

Parâmetro	Fórmula de Cálculo	Dados de entrada	Definição
<i>Coeficiente de Compacidade</i>	$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$	P – Perímetro da bacia (m) A – Área de drenagem (m ²)	Índice de forma que relaciona o perímetro da bacia com o perímetro do círculo de mesma área
<i>Fator de Forma</i>	$F = A/L^2$	A – Área de drenagem (m ²) L – Comprimento do eixo da bacia (m)	O fator de forma relaciona a forma da bacia com a de um retângulo, correspondendo a razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho com um fator maior
<i>Índice de Circularidade</i>	$IC = \frac{P^2}{12,57 * A}$	A – Área de drenagem (m ²) P – Perímetro da bacia	Índice de forma que avalia o grau de alongamento da bacia, tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada
<i>Rede Hidrográfica</i>	Confluência de canais	1ª, 2ª, 3ª ... ordem	Considera todos os canais sem tributários como de primeira ordem; os canais de segunda ordem, por outro lado, se originam da confluência de dois canais de primeira ordem; os de terceira ordem, por sua vez, formam-se pela junção de canais de ordem 2.
<i>Densidade de Drenagem</i>	$D_d = L_t/A$	Lt – Comprimento total de todos os canais (km) A – Área de drenagem (km ²)	Fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da rede perenes, intermitentes ou temporários e a área total da bacia
<i>Declividade</i>	Mapa de declividade	Valores de declividades de acordo com classificação adotada	A declividade do terreno consiste entre variação de altitude entre dois pontos do terreno e a distância horizontal que os separa
<i>Altitude</i>	Mapa de altitudes	Altitude mínima, média e máxima	Quanto maior a altitude da bacia, menor a quantidade de energia solar que o ambiente recebe e, portanto, menos energia estará disponível. Influencia diretamente sobre a temperatura

Fonte: adaptado de Villela e Mattos (1975)

As informações morfométricas da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano encontram-se na Tabela 18, calculados com base na Tabela 9, 17 e nos mapas geográficos com características da bacia.

Tabela 18 - Informações morfométricas da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano

Características Morfométrica		Valor
<i>Geométrica</i>	Área da Bacia (A)	72,69 km ²
	Perímetro da Bacia (P)	37,42 km
	Coeficiente de Compacidade (Kc)	1,18
	Eixo da Bacia (L)	13,80 km
	Fator de Forma (F)	0.40
	Índice de circularidade (IC)	0,69
<i>Relacionadas ao Relevo</i>	Orientação	Nordeste
	Declividade mínima	0,04 %
	Declividade média	4,75 %
	Declividade máxima	23,46%
	Altitude mínima	313,97 m
	Altitude média	376,89 m
<i>Rede de Drenagem</i>	Altitude máxima	445,14 m
	Comprimento total dos Canais (Lt)	56,25 km
	Comprimento do Canal Principal (Lp)	15,49 km
	Ordem da Bacia	4 ^a ordem
	Densidade de Drenagem (Dd)	1,38 km/km ²

Fonte: Próprio autor.

De acordo com as características morfométricas da Bacia do Córrego do Engano, o coeficiente de compacidade que relaciona a forma da bacia com um círculo apresenta o valor próximo de 1 (1,18) e o fator de forma que relaciona a bacia com a de um retângulo apresenta valor próximo do intermediário (0,40). Esses valores indicam que a bacia possui formato semelhante ao de uma circunferência, correspondendo, portanto, a uma bacia em forma de gota, tendo esse resultado confirmado pelo índice de circularidade, cujo valor é de 0,69. Esses valores indicam que a bacia tende a ser mais circular, favorecendo os processos de inundação e retenção de água (VILLELA; MATTOS, 1975).

3.1.6 Feições erosivas conhecidas na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano

Em 2008, o SigRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo apresentou um relatório com os mapas de feições erosivas urbanas e rurais da Bacia do Rio São José dos Dourados, CBH-SJD Nº 101/2004, onde encontra-se a bacia em estudo.

No projeto foram efetuadas a pesquisa bibliográfica, compilação das informações disponíveis em estudos de erosão já realizados na bacia do São José dos Dourados; interpretação de aerolevantamentos fotográficos dos anos de 1972 e 2000, a atualização do cadastramento dos processos erosivos urbanos, a visitas técnica em áreas rurais para a confirmação de informações e obtenção de dados diretos que permitam a caracterização da tipologia do processo, a realização do mapa de suscetibilidade à erosão da UGRHI 18 na escala 1:250 000.

O relatório feito pelo SigRH teve como principal objetivo a elaboração do mapa de feições erosivas urbanas e rurais da Bacia do Rio São José dos Dourados para atualizar os dados existentes das feições erosivas presentes na área urbana da bacia, buscando subsidiar o estabelecimento de diretrizes e orientações para o controle dos processos erosivos em zonas urbana e rural.

O relatório foi realizado em 4 etapas:

1 – Na primeira etapa, foi feito o levantamento de dados sobre a região da Bacia do Rio São José dos Dourados para catalogar todos os processos erosivos conhecidos na região, por meio de interpretações de fotografias aéreas dos anos de 1972 e 2000. O reconhecimento das erosões interpretadas nas fotografias aéreas foi armazenado em um banco de dados SIG – Sistema de Informações Geográficas com a finalidade de manipulação e tratamento dos dados por sub-bacias.

2 - Na segunda etapa do projeto foi realizado o trabalho de campo que consistiu nos municípios da Bacia do Rio São José dos Dourados, nas quais os técnicos da CPTI e IPT realizaram o cadastro das erosões pré-identificadas pelos técnicos do setor de obras das Prefeituras Municipais ou da CATI.

3 – Na terceira etapa do projeto foi realizada a interpretação dos dados obtidos no trabalho de campo, a elaboração dos mapas com feições erosivas interpretadas nas fotografias aéreas de 1972 e 2000, e o mapa de corpos hídricos de 2000.

4 - Na quarta etapa do projeto foi realizada a integração dos dados e análise das principais áreas erosivas, nos municípios da Bacia do Rio São Jose dos Dourados.

De acordo com os resultados do relatório realizado pelo SigRH, na área correspondente à Bacia do Córrego do Engano, no município de Nova Canaã Paulista, SP, foram catalogados 40 processos erosivos rurais e nenhum urbano. Sendo que a maior parte da bacia se encontra em área com muito alta susceptibilidade ao aparecimento de processos erosivos, sendo o Córrego do Engano um dos destaques mencionado no relatório (Figura 21).

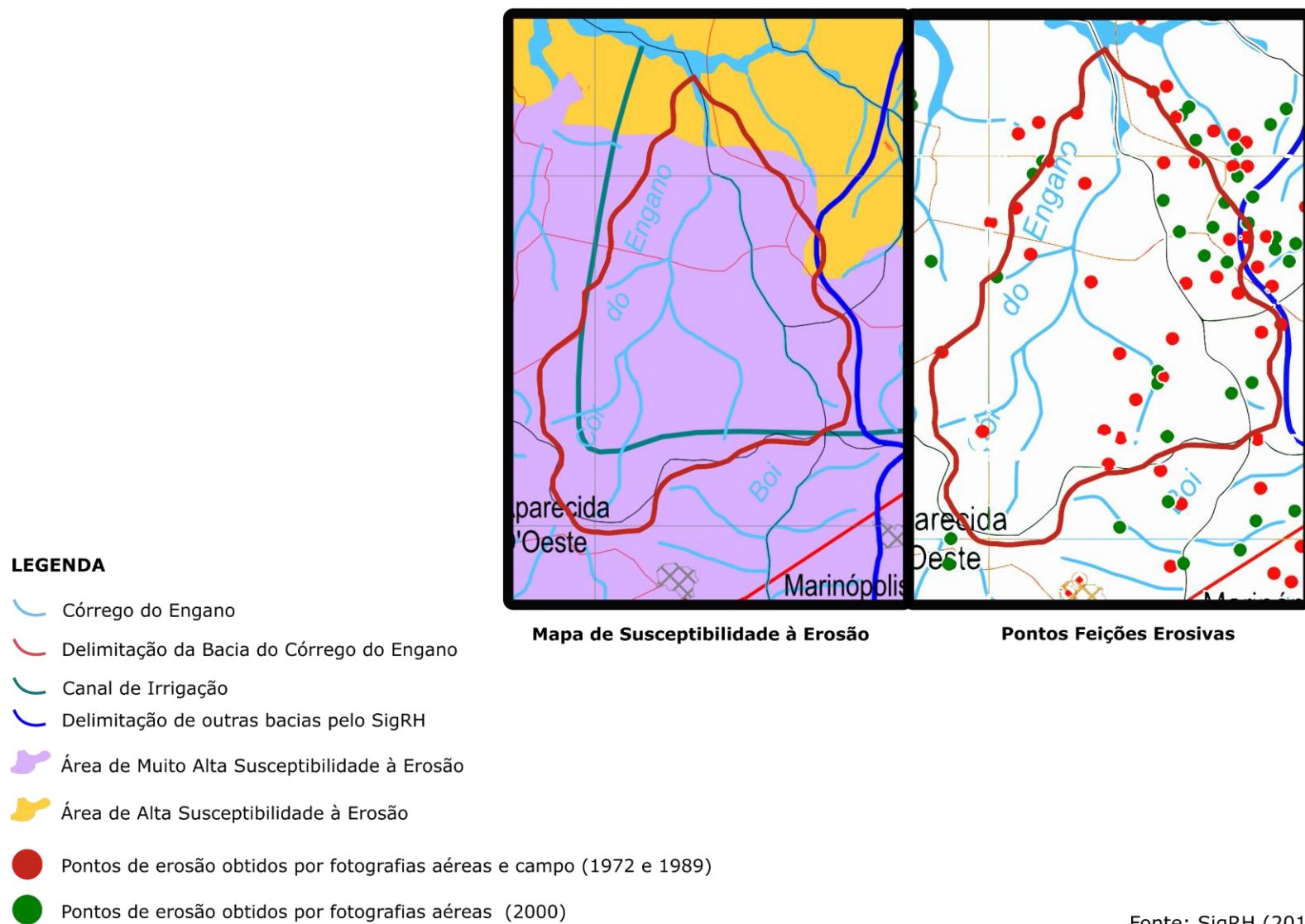
Ainda, de acordo com o relatório realizado pelo SigRH (2008), define-se que esse alto grau de suscetibilidade reúne determinadas características específicas do meio físico para terrenos com forte tendência erosiva como solos rasos e relevo de colinas médias com declividades acima de 12%. As cabeceiras de drenagens de primeira ordem refletem mais de perto a presença de solos pouco desenvolvidos e rasos (1m - 5m) onde o lençol freático encontra-se a pequena profundidade, favorecendo o fenômeno do piping (erosão tubular) que determina a formação de boçorocas. Além disso, nesta unidade, ravinas, sulcos e erosão laminar são intensos formando áreas bastante degradadas – importante ressaltar que esta definição é dada a toda a classe de alta susceptibilidade e não apenas a região de estudo.

Importante ressaltar em visita a campo, que será discutido posteriormente, ficou evidente a concentração de grandes erosões próximo aos corpos de águas que atravessam vias de tráfego rural com predominância de obras hidráulicas precárias.

A seguir, na Figura 22, são apresentados pontos numerados de 1 a 12, localizados via análise de imagens de satélite utilizando o programa Google Earth® com fotografias de 2018 disponibilizadas pela plataforma *DigitalGlobe*, onde foram encontrados processos erosivos em andamento. Na Figura 23 estes pontos, já georreferenciados, são apresentados em forma de recortes fotográficos para demonstrar a situação atual dos processos erosivos na região, que vão desde de processos superficiais (2) a grandes erosões (1 e 7). Importante ressaltar que estes

são apenas alguns dos processos erosivos presentes atualmente na região como forma de ilustração, sendo que existem diversos outros locais com problemática similar.

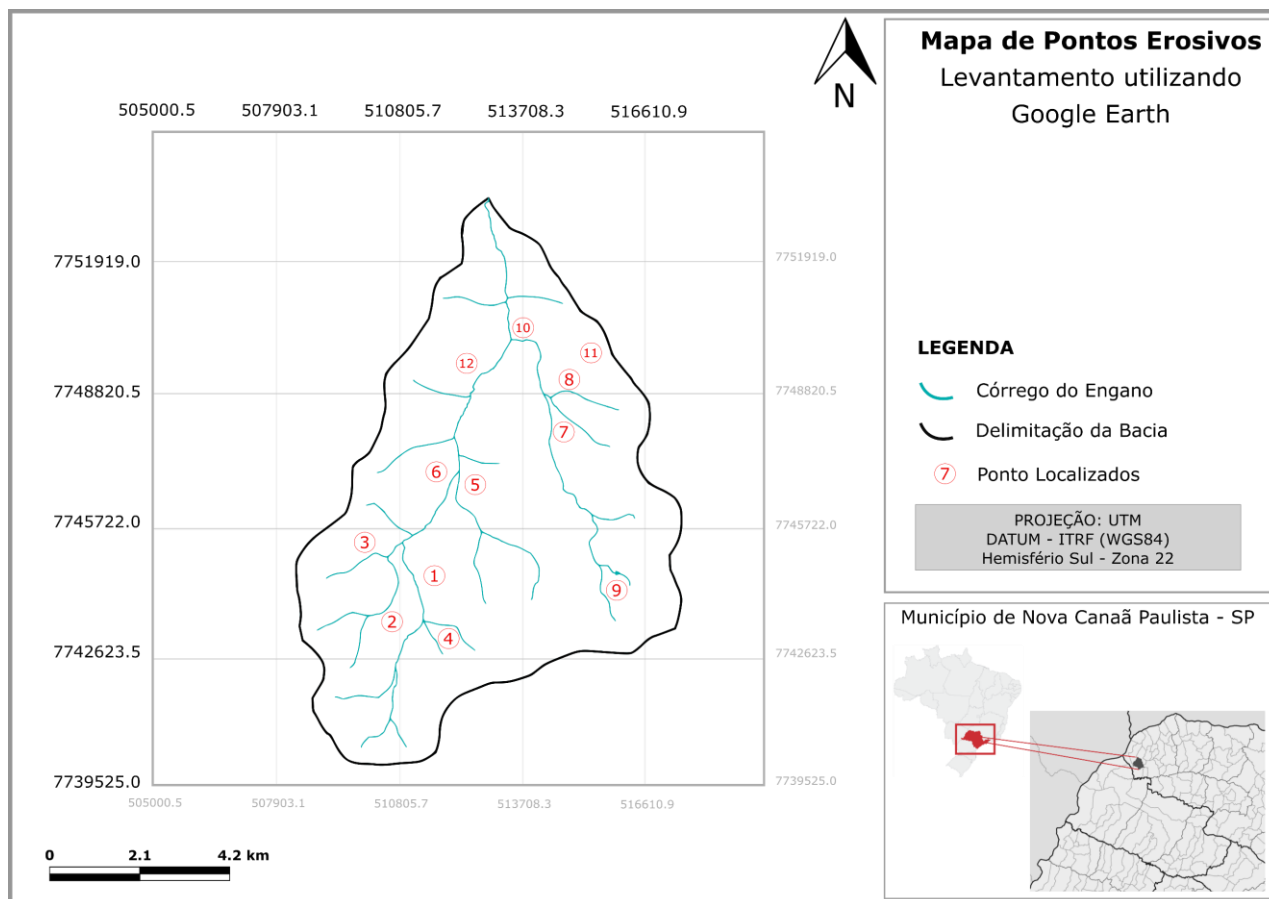
Figura 21 - Mapa de susceptibilidade à erosão e pontos conhecidos de processos erosivos



Fonte: SigRH (2018)

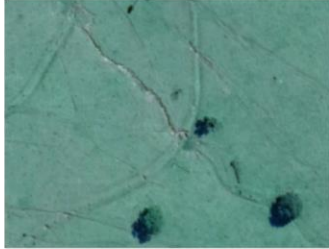
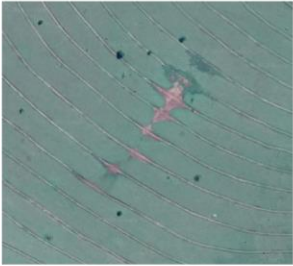
Fonte: Adaptado de SigRH (2018)

Figura 22 – Pontos com processos erosivos em 2018 na Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano por levantamento utilizando Google Earth



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Imagens dos processos erosivos locados e georreferenciados

①  20°24'03.0"S 50°53'23.3"W	②  20°24'31.8"S 50°53'57.6"W	③  20°23'36.2"S 50°54'13.5"W
④  20°24'49.2"S 50°53'19.5"W	⑤  20°22'40.5"S 50°52'56.4"W	⑥  20°24'49.2"S 50°53'19.5"W
⑦  20°22'05.1"S 50°51'39.5"W	⑧  20°21'35.9"S 50°51'37.4"W	⑨  20°24'06.4"S 50°50'59.2"W
⑩  20°20'44.9"S 50°52'02.0"W	⑪  20°21'31.2"S 50°50'53.4"W	⑫  20°21'03.2"S 50°52'40.1"W

Fonte: Próprio autor.

3.2 Análise da vulnerabilidade à erosão de acordo com a metodologia VNE

Como primeira aproximação para o desenvolvimento de um mapa de vulnerabilidade à ocorrência de processos erosivos na região do Córrego do Engano foi utilizada a metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001) sendo possível gerar cartas de vulnerabilidade natural à perda de solo. Esta metodologia foi desenvolvida a partir do conceito de Ecodinâmica proposta por Tricart (1977) da potencialidade para estudos integrados que as imagens de satélites permitem.

De acordo com Crepani *et al.* (2001), a aplicação da metodologia é primeiramente realizada com a integração e interpretação das informações temáticas disponíveis (mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, cobertura vegetal e de uso da terra) sobre as imagens de satélite. Estas imagens, juntamente com os Pls de dados, definem a Unidade Territorial Básica (UTB) que é composição das informações naturais ou antrópicas da região, sendo nesse estudo representado pela Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano. As unidades de paisagem natural, ou unidade territorial básica, são áreas georreferenciadas que possuem uma delimitação de um terreno onde contém uma combinação de eventos e interações, visíveis ou não, cujo resultado é registrado e pode ser visto em uma imagem. Para se analisar uma unidade de paisagem natural é preciso conhecer sua gênese e constituição física, forma, evolução e cobertura vegetal.

Em seguida, de acordo com Crepani *et al.* (2001), é conduzida uma classificação do grau de vulnerabilidade da unidade territorial adotada baseada nos processos de morfogênese (formação do relevo) e pedogênese (formação do solo), onde a vulnerabilidade é expressa pela atribuição de valores entre 1 e 3 em um total de 21 classes. Assim, com esse processo é possível confeccionar cartas de vulnerabilidade natural à erosão (VNE) com base em um banco de dados que contenha informações básicas do meio físico.

Conforme Tabela 19, a escala de vulnerabilidade de Crepani *et al.* (2001) estabelece 21 classes de vulnerabilidade à perda do solo que são distribuídas onde há o predomínio dos processos de pedogênese (valores próximos de 1,0), passando por uma área intermediárias (valores próximos de 2,0) e situações de predomínio dos processos de morfogênese (valores próximos de 3,0). O equacionamento da

metodologia, de acordo com Crepani *et al.* (2001) é feita aplicando-se o modelo individualmente a cada uma das classes relacionadas a Bacia Hidrográfica em estudo, como a geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima.

Tabela 19 – Escala de Vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas

Unidade de Paisagem	Média	Grau de Vulnerabilidade	Saturação de Cores
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	INTERMEDIÁRIO	
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: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

Cada um desses temas é inserido na Equação 3 que resulta em uma média aritmética que representa a posição de cada fator dentro da escala de vulnerabilidade.

$$V = \frac{(G+R+S+Vg+C)}{5} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

V = Vulnerabilidade;

G = vulnerabilidade para o tema geologia;

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia

S = vulnerabilidade para o tema solos;

Vg = vulnerabilidade para o tema vegetação;
C = vulnerabilidade para o tema clima

Dentro desta escala de vulnerabilidade, os valores mais próximos 1,0 são os que apresentam a maior estabilidade, enquanto os valores próximos de 2,0 são intermediários e os valores próximos de 3,0 as áreas mais vulneráveis.

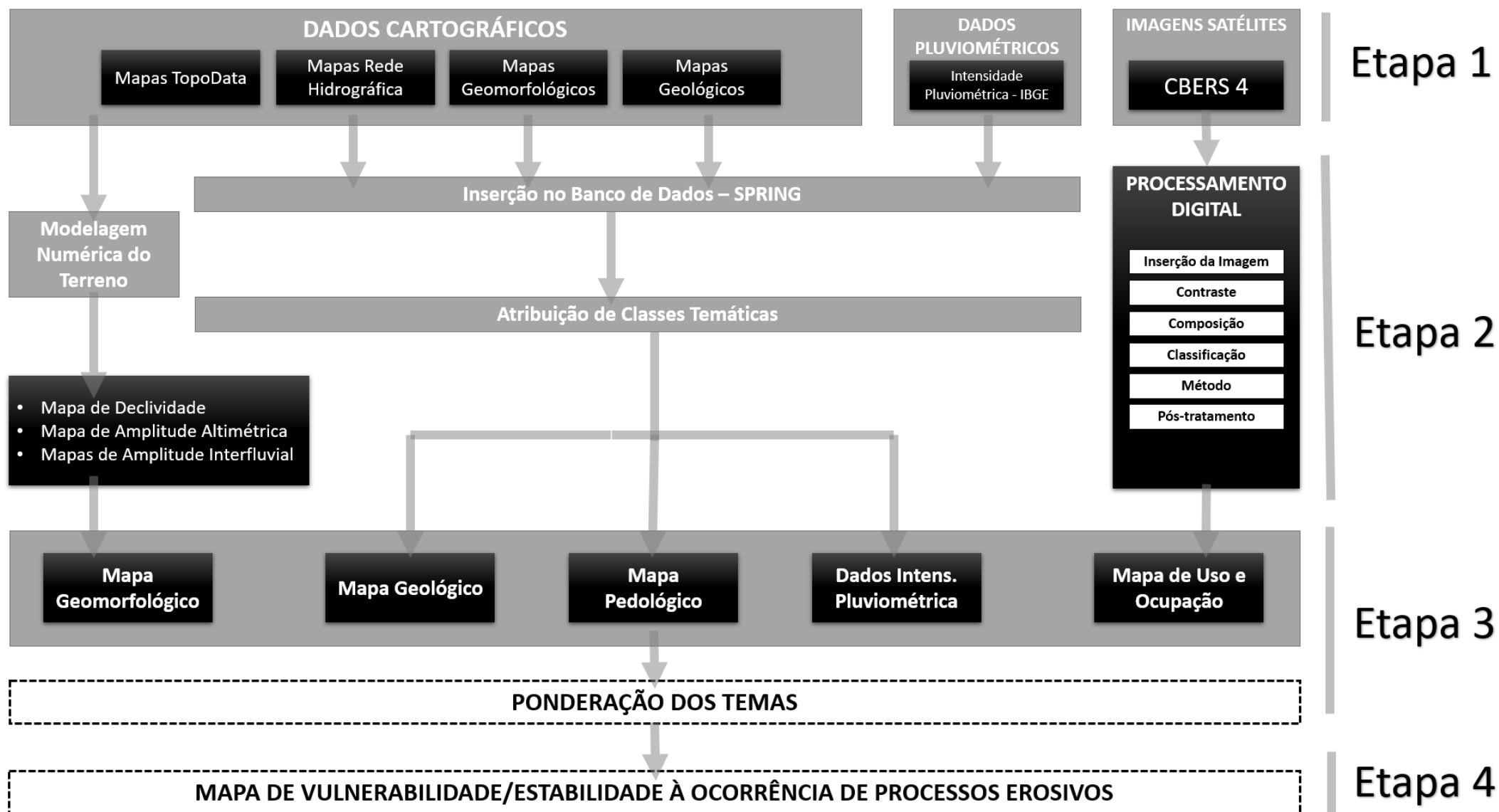
3.2.1 Aplicação da metodologia VNE em ambiente SIG

Para a aplicação da metodologia seguindo Crepani *et al.* (2001), utilizou-se como base cartográfica os mapas temáticos básicos de geologia, geomorfologia e pedologia (Figuras 17 e 20) e mapa de uso e ocupação do solo (Figura 18). Conforme mencionado, o mapa de solos foi obtido com base em arquivos SHAPEFILE provindos do relatório produzido por Rossi (2017) e disponibilizados pela plataforma DataGEO. As informações físicas quanto ao relevo foram obtidas através de processos de Modelagem Numérica do Terreno utilizando dados disponível pelo projeto TOPODATA e o padrões de drenagem foram com bases nos arquivos SHAPEFILES disponibilizados pelo IBGE para a hipsometria do município.

Todo o trabalho técnico computacional foi conduzido utilizando o Software SPRING 5.5.2, conforme as etapas de 1 a 4 presentes no organograma da Figura 24, onde foi criado o banco de dados com os seguintes planos de informações: limites da área de estudo, rede de drenagem, curvas de nível, imagens CBERS4, mapas de solo, geológico e geomorfológico e dados de precipitação

Etapa 1 – Aquisição de dados: momento em que foi selecionado os melhores dados e materiais cartográficos para a confecção do banco de dados. Foram obtidos dados cartográficos, imagens de satélites, cartas geológicas e informações climáticas. Além disso, foram realizados procedimentos cartográficos simples de mudanças de coordenadas e referência de alguns materiais para a inserção do banco de dados.

Figura 24 – Organograma de aplicação da metodologia VNE utilizando o software SPRING 5.5.2



Etapa 2 – Criação e manutenção do banco de dados: em posse dos materiais necessários foi criado o banco de dados após adaptações e correções conforme a necessidade de estudo do projeto. Além disso, foram criados os mapas geomorfológicos após caracterização da área utilizando imagens SRTM que altimetria e declividade e, também, a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo com base nas imagens de satélite do CBERS 4.

Etapa 3 – Mapas de ponderação: com a criação do banco dados a partir do processamento dos materiais foi possível obter os mapas necessários para a aplicação da metodologia de Crepani *et al.* (2001) conforme a Equação 3 gerando a ponderação de cada tema de acordo com os critérios de estabilidade e vulnerabilidade que a metodologia sugere.

Para a ponderação foram necessários a inserção de cada um dos mapas em uma categoria temática, sendo as operações realizadas utilizando a ferramenta LEGAL (conforme apêndice) presente no Software SPRING 5.5.2 que funciona como um algoritmo computacional seguindo a lógica atribuída a este programa. O algoritmo tem como principal função a atribuição do valor de vulnerabilidade a cada uma das classes temáticas em cada um dos temas de acordo com o mapa criado. Dessa forma, é criado uma grade triangular que possibilita considerar de forma mais precisa a contribuição de cada uma das classes (SCOTTO, 2012).

Etapa 4 – Elaboração do Mapa de Vulnerabilidade: após a criação dos mapas de classes é feito o cruzamento de dados entre os cinco diferentes temas (geologia, geomorfologia, pedologia, clima e uso/ocupação do solo) de acordo com a Equação 3 a qual realiza uma média aritmética entre as classes considerando os valores atribuídos a cada classe em cada tema.

De acordo com Scotto (2012), esse processo permitiu definir 21 classes – conforme Tabela 19 – para representar cada um dos graus de vulnerabilidade, sendo que cada uma dessas classes está relacionada com uma condição de estabilidade do ambiente variando entre menos estável (3,0) até a mais estável (1,0).

Em resumo, o processamento consistiu em: (1) inserção dos arquivos SHAPEFILE contendo a rede de drenagem; (2) utilização das imagens SRTM para elaboração do mapa de orientações de vertentes e posterior delimitação da área de estudo; (3) elaboração do mapa de declividade; (4) inserção do mapa de solos

conforme trabalho de Rossi (2017); (5) classificação da imagem CBERS para determinação do uso e ocupação do solo; (6) ponderação por grade numérica dos mapas temático de cada características física conforme Crepani *et al.* (2001); (7) criação do mapa final cadastral de vulnerabilidade conforme ponderação dos temas.

De acordo com Ribeiro & Campos (2007), a análise e interpretação das imagens devem ser feitas considerando-se os padrões dos mapas identificados pelas variações de cor, textura, forma, padrões de drenagens e relevo. Sendo a vulnerabilidade geral da bacia em estudo estabelecida conforme a escala de valores de Crepani *et al.* (2001) de acordo com a relação entre os fatores que interferem nos processos erosivos, analisando-se cada um dos temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e clima.

3.2.1.1 Geologia

Na área estudada, de acordo com o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (2006), ocorre a predominância de dacitos (1,62 km²), arenitos (44,22 km²) e arenitos/argilitos arenosos (26,62 km²), conforme Figura 25.

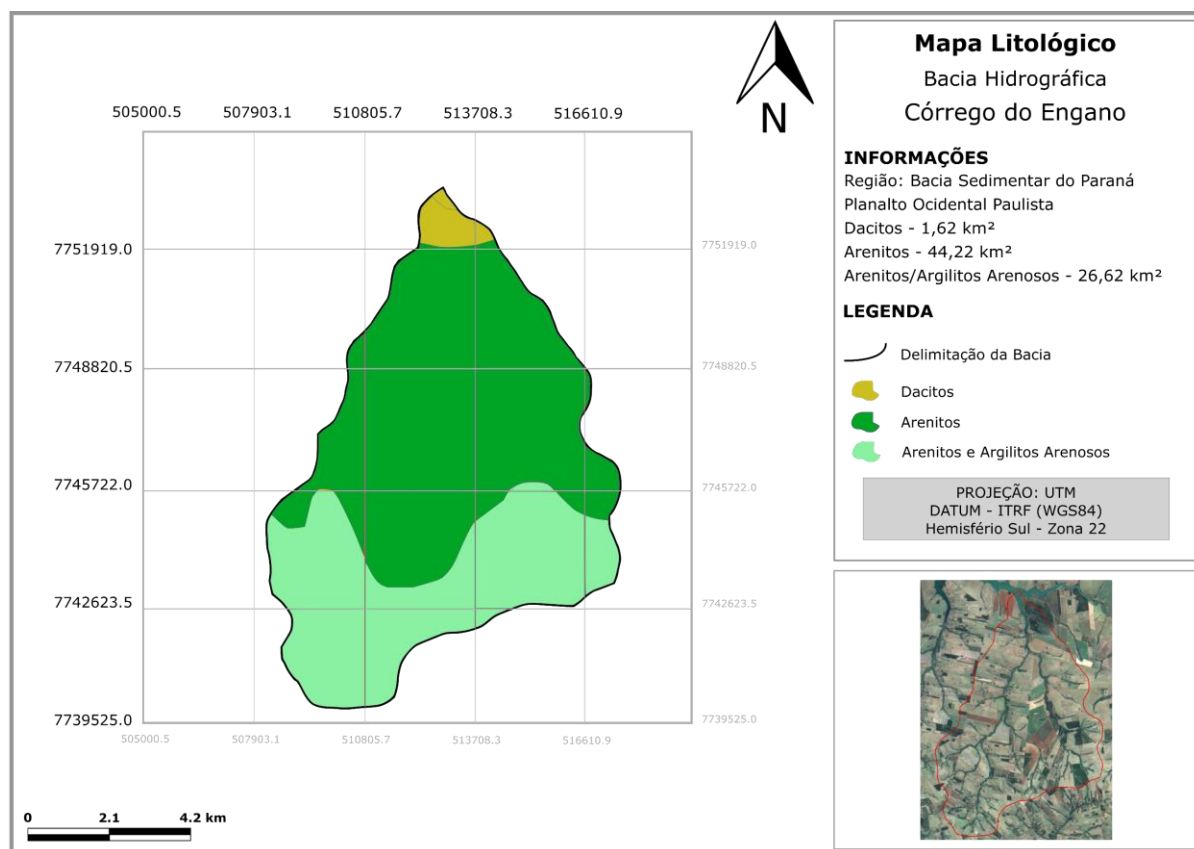
Dessa forma, a escala de vulnerabilidade para esses tipos de litologia será adotada conforme a Tabela 20 a qual apresenta as escalas de vulnerabilidade de acordo com Crepani *et al.* (2001) para cada tipo de rocha encontrada na área de estudo.

Tabela 20 – Escala de vulnerabilidade das rochas mais comuns

Rocha	Vulnerabilidade
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartizo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
...	...
Filito e Metassilito	2,1
Ardósia e Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos	2,4
Conglomerados e Subgrauvacas	2,5
Grauvacas e Arcózios	2,6
Silitos, Argilitos	2,7

Fonte: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

Figura 25 – Mapa litológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.2 Solos (pedologia)

De acordo com a Figura 20 e Rossi (2017), para a área estudada os principais tipos de solos encontrados são os Argissolos vermelho-amarelos (PVA1) os Argissolos Vermelhos (PV4), e os Gleissolos Háplicos (GX5), respectivamente. E, de acordo com a Tabela 21, a escala de vulnerabilidade para cada classe de solo é: 2,0 (PVA1), 2,0 (PV4) e 3,0 (GX5).

Tabela 21 – Valores de vulnerabilidade dos solos

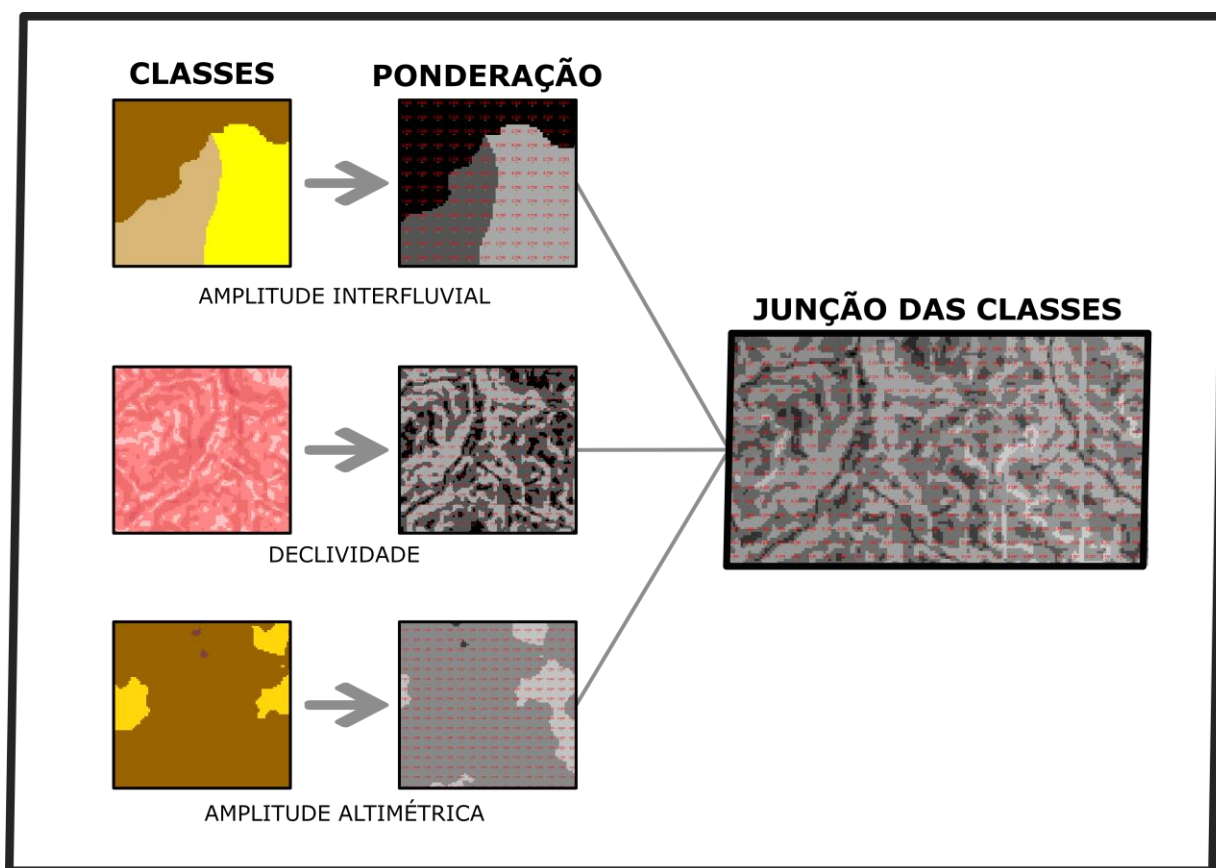
Classe de Solo	Legenda	Vulnerabilidade
Latossolo Bruno		1,0
Argissolo	P	2,0
Luvissolo	T	2,0
...	...	...
Organossolo	O	3,0
Gleissolos	G	3,0
Plintossolo	F	3,0

Fonte: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

3.2.1.3 Geomorfologia

Para a confecção da carta de vulnerabilidade referente ao tema geomorfologia é necessário fazer a sobreposição de três diferentes informações geomorfológicas: dimensão interfluvial média, amplitude altimétrica e declividade. Para a elaboração dessas cartas é necessário utilizar processos de modelagens numéricas do terreno realizando o fatiamento e ponderação das informações métricas de acordo com o parâmetro físico em estudo (Figura 26). Cada um desses temas possui uma classe de vulnerabilidade para cada amplitude.

Figura 26 – Ponderação do tema geomorfologia



Fonte:

De acordo com Ross e Morox (1996), a formação do relevo da região em estudo é do tipo Dt12, na unidade do Planalto Centro Ocidental, contendo colinas amplas e baixas com formas de dissecção baixa, vales pouco entalhados e densidade de drenagem baixa.

Para o tema declividade, de acordo com a Tabela 18, tem-se o valor mínimo próximo de 0,00% e o máximo próximo de 25%, portanto, de acordo com a Tabela 22, o valor da vulnerabilidade irá variar entre 1,0 e 2,0.

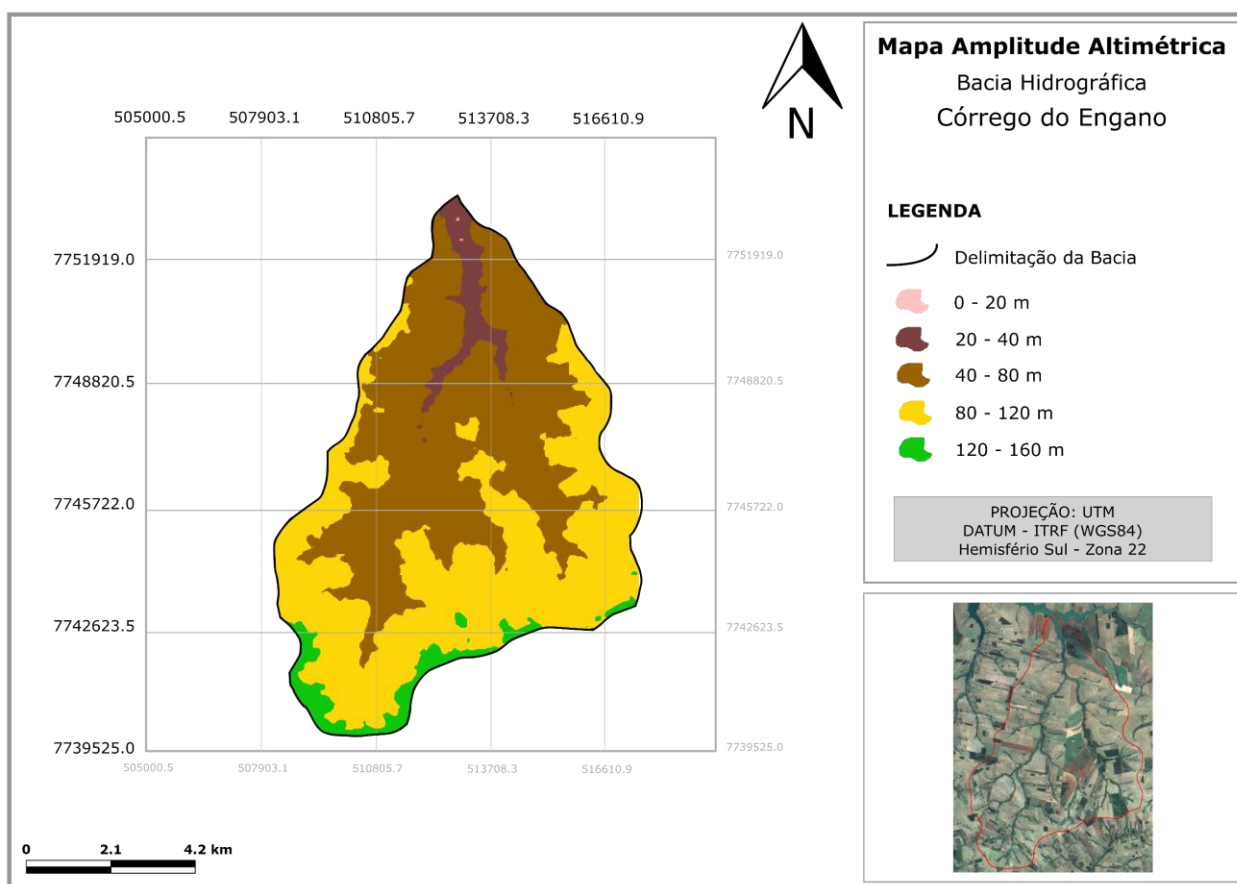
Tabela 22 – Classes de declividade com os respectivos valores da escala de vulnerabilidade

Classe Morfométrica	Declividade (%)	Vulnerabilidade
Muito Baixa	< 2	1,0
Baixa	2 – 6	1,5
Média	6 – 20	2,0
Alta	20 – 50	2,5
Muito Alta	> 50	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

Para o tema amplitude altimétrica, o mapa foi obtido com base nas imagens TOPODATA onde estas foram interpoladas criando uma grade retangular para posterior fatiamento conforme as classes da Tabela 23. A partir dessa divisão foi obtido o mapa da Figura 27 com a separação de cada região de acordo com a amplitude altimétrica, onde as classes entre 40 e 80 metros e 80 e 120 metros são as que possuem maiores representatividade.

Figura 27 – Mapa de amplitude altimétrica



Fonte: Próprio autor.

Tabela 23 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude altimétrica

Amplitude Altimétrica (m)	Vulnerabilidade
0 – 20	1,0
20 - 40	1,3
40 - 80	1,7
80 - 120	2,0
120 - 160	2,3

Fonte: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

Para o tema amplitude interfluvial foi feito o estudo da dissecação do relevo através da rede de drenagem sendo esta obtida pelas medidas de distâncias entre os canais da rede hidrográfica. De acordo com Scotto (2012), a dissecação do relevo pela drenagem corresponde à fragilidade da rocha ao intemperismo onde rochas e solos mais impermeáveis tendem a impedir a infiltração das águas da chuva, possibilitando o transporte superficial e conseqüente formações de canais, assim,

aumentando a capacidade erosiva. Dessa forma, a dissecação será maior em locais onde o espaçamento entre os interflúvios for menor, sendo esta área mais vulnerável.

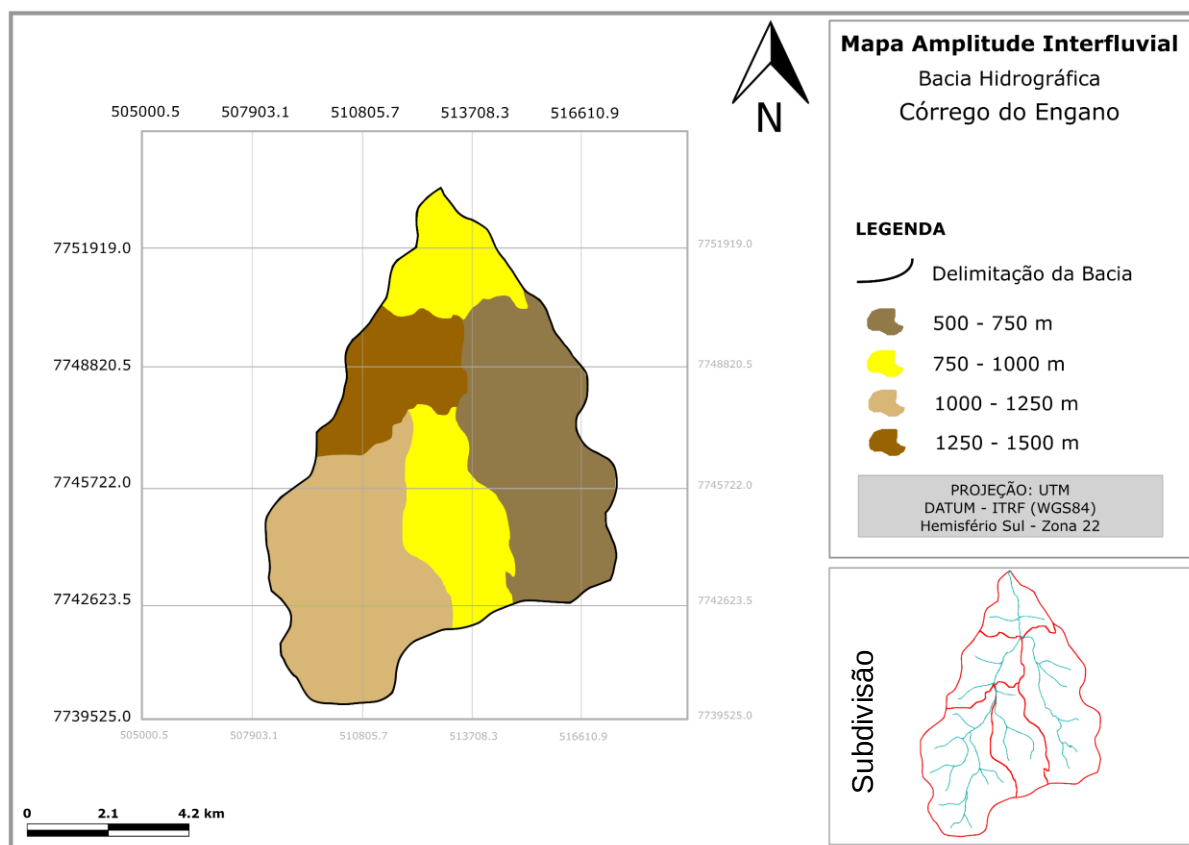
De acordo com Florenzano (2008), primeiramente deve-se fazer a divisão da área de estudo em unidades geomorfológicas menores, criando uma subdivisão com base em características geológicas e morfológicas semelhantes. Cada nova subdivisão foi realizada utilizando como limites os talwegues entre as áreas de drenagem. Em seguida, o cálculo da amplitude interfluvial é feito de acordo com: (1) cálculo da distância entre canais de drenagem no interior de uma unidade geomorfológica, sendo feito a média entre três a cinco valores para pequenas áreas; (2) seleção de pelos três valores representativos para a área e cálculo da média e (3) elaboração do mapa temático com os valores representativos da amplitude interfluvial em cada área. Seguindo essas etapas, foi possível elaborar a Figura 28 que divide a Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano em 4 diferentes classes de amplitude interfluvial variando entre 500 e 1500 metros, baseando-se nos valores presentes na Tabela 25.

Tabela 24 – Valores de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial

Amplitude Interfluvial (m)	Vulnerabilidade
500 – 750	2,8
750 - 1000	2,7
1000 - 1250	2,6
1250 - 1500	2,5

Fonte: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

Figura 28 – Mapa de Amplitude Interfluvial



Fonte: Próprio autor.

Após a atribuição dos valores de vulnerabilidade de acordo com os parâmetros físicos dimensão interfluvial, amplitude altimétrica e declividade é calculada, então, a carta final de vulnerabilidade geomorfológica com base na Equação 4, sendo realizada uma ponderação entre os três mapas conforme Figura 26. Esta equação é uma média aritmética dos valores de vulnerabilidade para cada um dos atributos geomorfológicos, possibilitando o cálculo de vulnerabilidade par ao tema geomorfologia.

$$V = \frac{(G+A+D)}{3}$$

Equação 4

Onde:

R = Vulnerabilidade para o tema geomorfologia;
G = vulnerabilidade para a dimensão interfluvial;
A = vulnerabilidade para a amplitude altimétrica;
D = vulnerabilidade para a declividade.

3.2.1.4 Uso e Ocupação da área

A carta de vulnerabilidade definida pelas classes de uso e ocupação do solo na região foi feita com base na classificação representada pela Figura 18 sendo atribuído os valores de estabilidade de acordo com a Tabela 25. Esses valores são uma modificação da metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001) feita por Ribeiro & Campos (2007) devido às similaridades com a região em estudo.

Tabela 25 – Valores de vulnerabilidade à erosão associados às classes de uso do solo

Classe de Uso do Solo	Vulnerabilidade
Água	1,5
Cultura Perene	2,9
Cultura Anual	3,0
Pastagem	2,8
Mata	1,0
Solo exposto	3,0
Cidade	1,0
Reflorestamento	1,5

Fonte: adaptado de Ribeiro & Campos (2007)

Dessa forma, de acordo com as classes presentes na área, os valores de vulnerabilidade variam entre 1,0 (para a área urbana e matas), passando por valores intermediários de 1,5 (para reflorestamento) até 3,0 (para culturas e solo exposto).

3.2.1.5 Clima

A carta de vulnerabilidade referente ao clima foi confeccionada por meio da divisão do valor da pluviosidade anual (mm) por 12, sendo este a quantidade de meses em um ano, obtendo-se a média mensal de 102,16 mm/mês de acordo com valores histórico de dados para o pluviômetro mais próximo da bacia em estudo (CIIAGRO, 2018). Desta forma, é possível representar uma escala de vulnerabilidade da área de acordo com a intensidade pluviométrica conforme Tabela 26. Como existe um único valor médio de precipitação para toda a região de estudo (devido à ausência de estações pluviométricas próximo a região de estudo), o mapa de amplitude de precipitação possui apenas um valor para a vulnerabilidade sendo 1,2 na escala de Crepani *et al.* (2001). Importante ressaltar que Crepani sugere utilizar apenas os

valores maiores de precipitação em 6 meses, porém, por critério do autor foi utilizado apenas a média anual.

Tabela 26 - Escala de intensidade pluviométrica e valores de vulnerabilidade à erosão

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
< 50	1,0
50 - 75	1,1
75 - 100	1,2
100 - 125	1,3
125 - 150	1,4
...	...

Fonte: adaptado de Crepani *et al.* (2001)

Por fim, com a junção de todas estas informações foi possível produzir o mapa de vulnerabilidade utilizando o ambiente LEGAL do programa SPRING – conforme algoritmo 1 em anexo no apêndice – o qual foi utilizado para comparação e validação com base em imagens atuais via Google Earth e com saída de campo.

3.3 Análise da Equação Universal da Perda de Solos

A Equação Universal da Perda de Solos (USLE - Universal Soil Loss Equation), é um dos modelos mais utilizados e difundidos quanto ao estudo da perda de solo em determinada região. O método utiliza as características e propriedades dos fatores ambientais considerados responsáveis e controladores das perdas de solos, permitindo a divisão da paisagem em níveis de instabilidade (BESKOW *et al.*, 2009) – com base nos fatores utilizados na Equação 01 – possibilitando, após o cálculo da Taxa Anual de Perda de Solos, ações efetivas de planejamento ambiental e otimização dos recursos naturais (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Relembrando que dentre os fatores que influenciam os processos erosivos estão: a erosividade da precipitação, medida principalmente pela sua intensidade; a erodibilidade, característica intrínseca a cada tipo de solo, podendo ser determinada in situ ou indiretamente por métodos que consideram as características físicas e químicas do solo; a cobertura vegetal, pela sua maior ou menor proteção do solo, a

declividade e comprimentos das encostas; e as práticas de conservação e manejo dos solos existentes.

Importante considerar que o modelo da USLE foi desenvolvido em meados de 1950 e o uso de ferramentas computacionais não era algo corriqueiro como se observa hoje. Com o avanço da computação e de pesquisas utilizando SIGs, foi possível utilizar estas ferramentas para facilitar o cálculo da Equação Universal da Perda de Solos em um ambiente virtual considerando sua variabilidade espacial, uma vez que todos os fatores utilizados na fórmula podem ser georreferenciados de acordo com uma localidade e atribuindo o valor de cada fator. Possibilitando, dessa forma, a criação de um banco de dados para posterior ponderação, gerando um mapa final com os valores de Perda de Solo para área de estudo, sendo esse local de pequeno ou grande.

Após calculado o valor da taxa anual de perda de solo uma das formas de avaliação do resultado é fazendo comparações com o tipo de solo encontrado no local e sua taxa de tolerância a perda para saber se a área apresenta regiões com características e probabilidade de ocorrência de processos de erosão laminar.

Existem diversos trabalhos – nacionais e internacionais - onde se é calculada a Perda de Solo em determinada região utilizando a metodologia da USLE com ajuda de um banco de dados de informações em um ambiente SIG (COSTA, 2005; THOMPSON; FIDALGO, 2013; GRAÇA *et al.*, 2015; GASNARI; RAMESH, 2016). Entretanto, há uma tendência entre os trabalhos em generalizar a precisão dos dados utilizando bancos de dados genéricos ou para áreas muito grandes não representando fielmente a região em estudo.

Sendo assim, o cálculo da Perda de Solo Anual por meio da USLE foi feito em duas formas:

Forma de Cálculo 1 – Considerando dados mais genéricos de pequena escala (com pouca resolução ou detalhe) para cada um dos fatores de acordo com literatura científica na área. Por exemplo, o mapa de solos do estado de São Paulo foi utilizado para determinar a erodibilidade e o mapa geral de chuvas para todo o estado foi utilizado a erosividade. Os outros fatores serão discutidos separadamente

Forma de Cálculo 2 – Considerando dados mais detalhados de grande (com melhor resolução e detalhe) com base em mapas de elevação de alta resolução, dados de pesquisa em campo com amostragem de solos e processos de Krigagem para cálculo mais precisos. Os fatores serão discutidos posteriormente.

A intenção em utilizar essas duas formas de cálculo é propiciar uma comparação entre dados científicos mais abrangente e genéricos com outros mais precisos para uma mesma área utilizando uma mesma metodologia científica. Dessa forma será possível verificar de qual forma as diferenças nas fontes de dados utilizados influência no resultado.

3.3.1 Aplicação da Equação Universal da Perda de Solo em ambiente SIG

Para a aplicação da Equação Universal da Perda de Solo em ambiente SIG, utilizou-se como base cartográfica os mapas temáticos básicos de geologia, geomorfologia e pedologia (Figuras 17 e 20) – para a primeira aproximação com base de dados abrangente – e o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 18) – para ambas as formas de cálculo. Além desses dados, foram utilizadas diversas metodologias para incremento de mapas no banco de dados considerando cada um dos parâmetros utilizados na USLE tanto para o cálculo da primeira quanto segunda forma. Cada fator será discutido separadamente a seguir de acordo com suas peculiaridades.

Todo o trabalho técnico computacional foi conduzido utilizando o Software SPRING 5.5.2 e o SAGA (CONRAD *et al.*, 2007), seguindo as etapas de 1 a 3 presentes no organograma da Figura 29, onde foi criado o banco de dados com os seguintes planos de informações: limites da área de estudo, rede de drenagem, curvas de nível, imagens CBERS4, mapas de solo, geológico e geomorfológico, mapa de classificação, modelo digital de elevação ALOS PALSAR, mapas de Krigagem, mapa de comprimento de rampa, dados de precipitação, dados de erosividade e mapa finais (relação detalhada do banco de dados no apêndice).

Etapa 1 – Aquisição dos dados e montagem do banco de dados com as informações necessárias para a aplicação das metodologias de cálculos de cada um

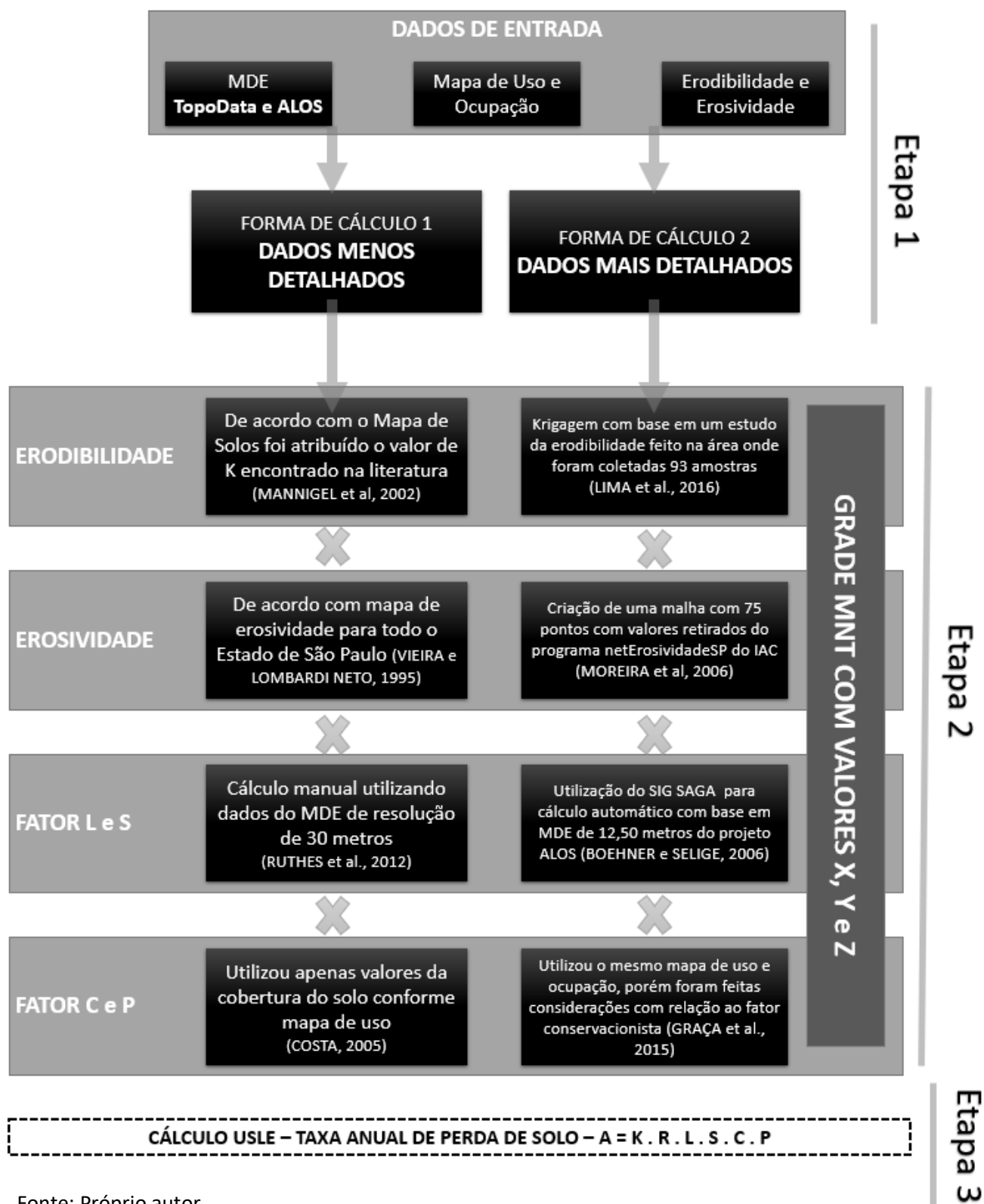
dos fatores de acordo com a literatura citada dando enfoque em qual dado seria utilizado para a forma de cálculo 1 e forma de cálculo 2.

Etapa 2 – Criação das grades numéricas dentro do banco de dados do SPRING o qual serão utilizados em programação LEGAL para o cálculo seguindo a fórmula da Equação Universal da Perda de Solos. Cada um dos fatores foi calculado separadamente para cada forma de cálculo, sendo que na Forma de Cálculo 1 os dados são mais abrangentes (genéricos para uma grande área, ponderações com menor acurácia e mapas com menores resoluções) e para a Forma de Cálculo 2 o contrário. Importante ressaltar que todos os dados são baseados em fontes científicas oriundas de banco de dados de acesso público.

Etapa 3 – Cálculo final a partir da USLE em programação LEGAL considerando cada um dos fatores da equação onde foram gerados dois mapas de Taxa Anual de Perda de Solo que é a informação necessária para o estudo da probabilidade de processos erosivos na região da bacia do Córrego do Engano e posterior divisão em classes.

A seguir, serão discutidos cada um dos fatores da Etapa 2 e como eles foram trabalhados e calculados para utilização na metodologia proposta

Figura 29 – Organograma mostrando as etapas adotadas para as duas formas de cálculo da USLE



Fonte: Próprio autor.

3.3.1.1 Erodibilidade (Fator K)

O fator erodibilidade foi obtido a partir dos resultados observados por Mannigel *et al.* (2002) que fez uso do método indireto de determinação (BOYUCOS, 1935) em um estudo da erodibilidade e tolerância a perda para os solos do estado de São Paulo. Dessa forma, com base na Figura 20, tem-se três valores de erodibilidade (t.ha.h/ha.MJ.mm) para a região, sendo: solo PVA1 – Argissolos Vermelhos onde $K = 0,0466$; solo PVA4 – Argissolos Vermelho Amarelo onde $K = 0,0228$ e solo GX5 – Gleissolos Háplicos onde $K = 0.0044$.

Para a Forma de Cálculo 2 foi utilizado dados amostrais do Levantamento Taxonômico de Solos realizado pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos (DEFERS) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP em 41 propriedades rurais sob ambiente de produção de cana-de-açúcar e áreas de pastagens pertencentes à Usina Vale do Paraná S/A (ALVES *et al.*, 2009).

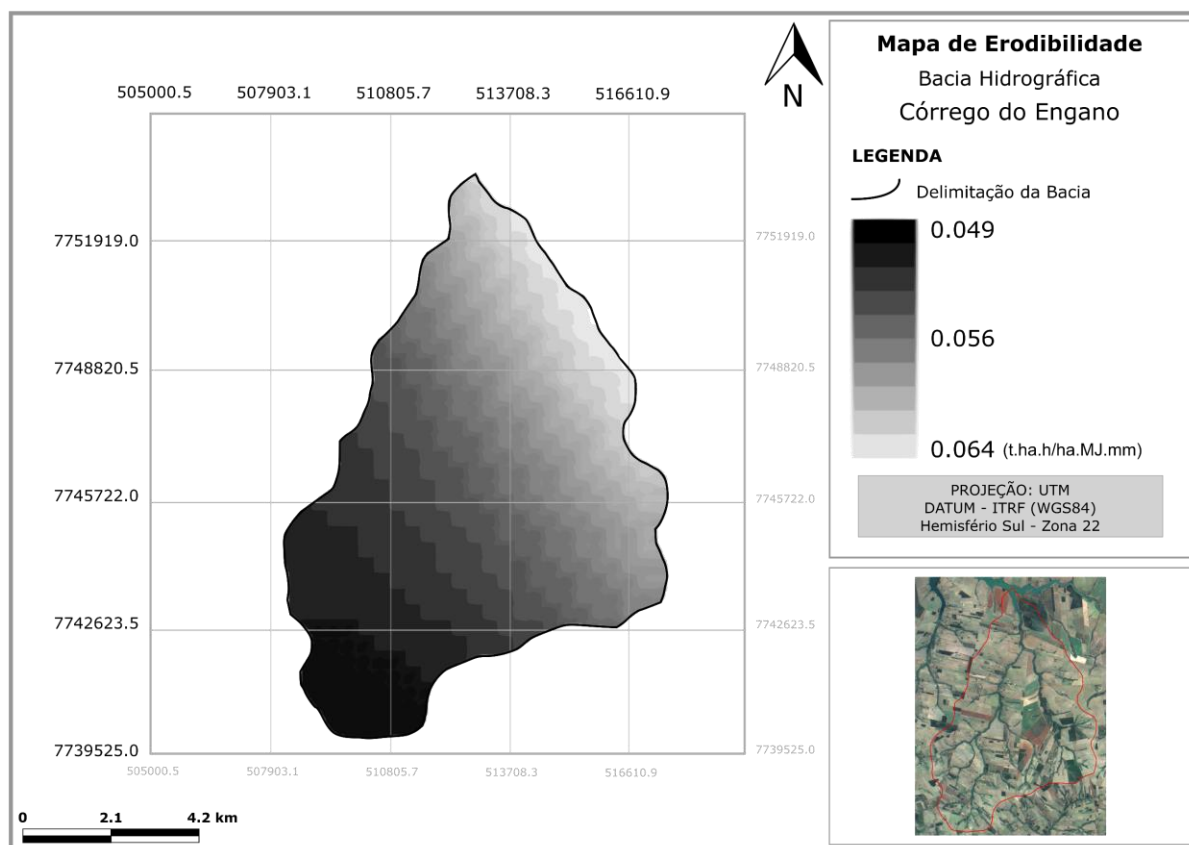
Os dados em questão estão inseridos em uma área amostral situada entre as coordenadas geográficas $20^{\circ}12'56''S$ - $50^{\circ}44'48''W$ e $20^{\circ}31'48''S$ - $51^{\circ}17'02''W$, compreendendo em sua grande parte a região planáltica ocidental da bacia Hidrográfica do Baixo São José dos Dourados, Noroeste do estado de São Paulo, onde são abrangidos territórios dos municípios de Ilha Solteira, Suzanápolis, Santana da Ponte Pensa, Rubinéia, Nova Canaã Paulista, Aparecida d'Oeste e Três Fronteiras, onde está situada a Bacia do Córrego do Engano. Assim, foram avaliados ao todo, dados de 93 trincheiras individuais compreendendo 5 ordens de solos, sendo eles: Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Neossolos e Nitossolos.

As amostras do solo (deformadas), consideradas para a determinação da granulometria do solo foram identificadas, preparadas e analisadas conforme metodologias e normas técnicas específicas (EMBRAPA, 2011).

A partir dos dados granulométricos das 93 amostras georreferenciadas (com as coordenadas X e Y para localização e Z para o valor de erodibilidade) foi determinado a erodibilidade para toda área por meio da mesma metodologia de Boyucos A partir desses dados foi possível criar uma malha de dados fazendo-se a análise semivariográfica com o uso do geoestatístico GS^+ (ROBERTSON, 1998). Após validar a dependência espacial da erodibilidade foi possível realizar a

interpolação para toda área por meio de Krigagem Ordinária. Dessa forma, foi possível representar a erodibilidade da Bacia do Córrego do Engano com base na variabilidade natural apresentadas pelos dados amostrais reais da área. Os valores de Erodibilidade encontrados variam entre 0,0490 e 0,0640 (t.ha.h/ha.MJ.mm) conforme Figura 30.

Figura 30 – Mapa de Erodibilidade para cálculo da USLE obtido por Krigagem



Fonte: Próprio autor.

3.3.1.2 Erosividade (Fator *R*)

O fator erosividade foi obtido a partir de dados da literatura para a Forma de Cálculo 1 (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995) em um estudo onde foi feito o levantamento dos valores de erosividade para todo o estado de São Paulo com base em diversas estações meteorológicas sendo que a mais próxima da Bacia do Córrego do Engano encontra-se no município de Urânia - SP. Por se tratar de uma área pequena, próxima a Bacia do Córrego do Engano encontra-se apenas uma estação

oficial que é constantemente monitorada sendo adotada um único valor de erosividade para toda a região na primeira forma de cálculo para a USLE.

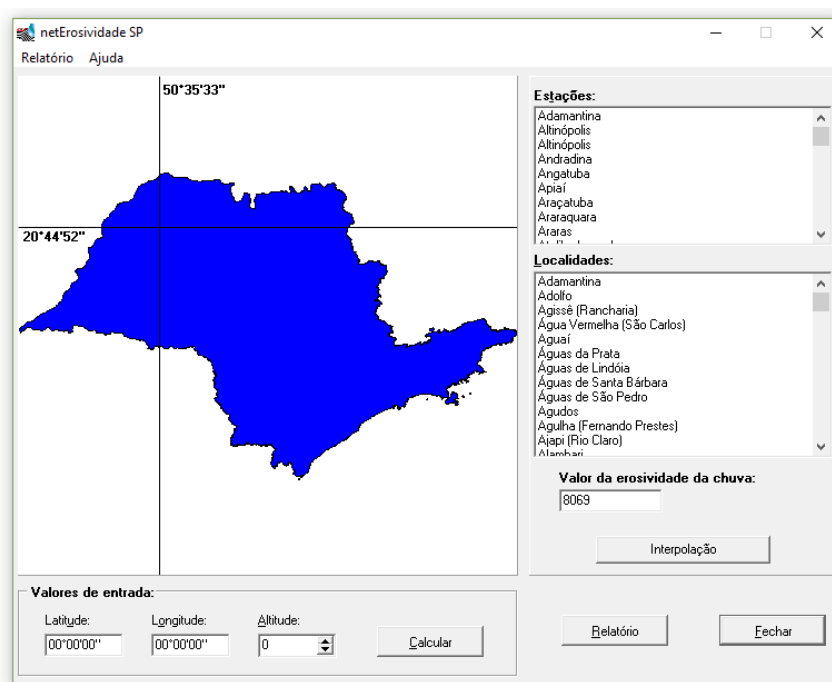
Este valor foi calculado seguindo a metodologia de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) onde para cada local e para cada mês o índice de erosão média mensal pode ser obtido de acordo com a seguinte fórmula:

$$EI_m = 68,730 (p^2/P)^{0,841} \quad (4)$$

Onde p é a precipitação média mensal (mm) e P é a precipitação média anual (mm). Por fim, a erosividade – ou fator R – é calculado como a somatório do EI para cada mês sendo que na região em estudo o valor utilizado será de 6.556,00 (MJ.mm/ha.h.ano) de acordo com a estação no município mais próximo.

Para a Forma de Cálculo 2 foi feito uma aproximação mais complexa utilizando o software netErosividade – SP (MOREITA *et al.*, 2006) onde é utilizado e implementada uma rede neural de dados que mapeia o valor do fator R para todo estado de São Paulo. A forma de obtenção do valor da erosividade depende da entrada de duas informações sendo as coordenadas de localização do ponto de interesse e a altitude do local, conforme Figura 31.

Figura 31 – Interface do programa netErosividade - SP

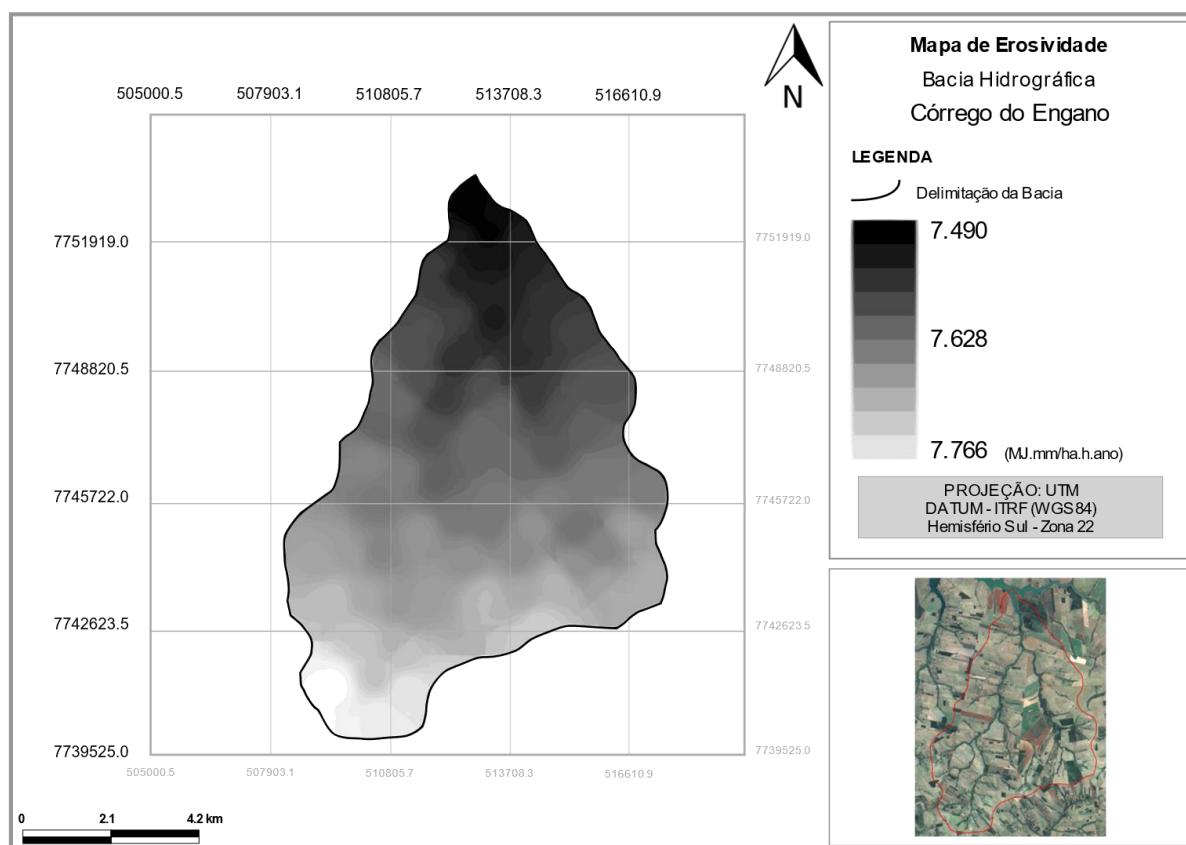


Fonte: Próprio autor.

Para a criação de uma grade MNT que fez parte da composição do algoritmo LEGAL foram alocados 75 pontos aleatórios sob o mapa altimétrico dentro da área da Bacia do Córrego do Engano (número aleatório suficiente para abranger de forma satisfatória uniformemente toda área da bacia). Dessa forma, cada uma dessas amostras possui três valores georreferenciados X, Y e Z onde X e Y são as coordenadas de localização e Z a altitude de cada ponto.

Com as informações X, Y e Z de cada ponto e o programa netErosividadeSP foi possível encontrar 75 diferentes valores de erosividade dentro da área de estudo variando entre 7.490,00 e 7.766,00 (MJ.mm/ha.h.ano). Posteriormente, cada ponto georreferenciado, com o referido valor do Fator R, foi inserido em um novo PI dentro do software SPRING onde foi possível gerar – por método de interpolação considerando a média quadrática – uma grade de resolução 10 x 10 metros com diferentes valores de erosividade para toda a Bacia do Córrego do Engano, conforme mapa da Figura 32.

Figura 32 - Mapa de Erosividade para cálculo da USLE obtido pelo netErosividade



Fonte: Próprio autor.

3.3.1.3 Fatores topográficos (Fatores L e S)

Na equação Universal da Perda de Solos os fatores topográficos L e S estão diretamente relacionados com o tipo de relevo da região, sendo o S referente à declividade da encosta e L ao comprimento de encostas. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1985) a equação utilizada para cálculo dos dois fatores é:

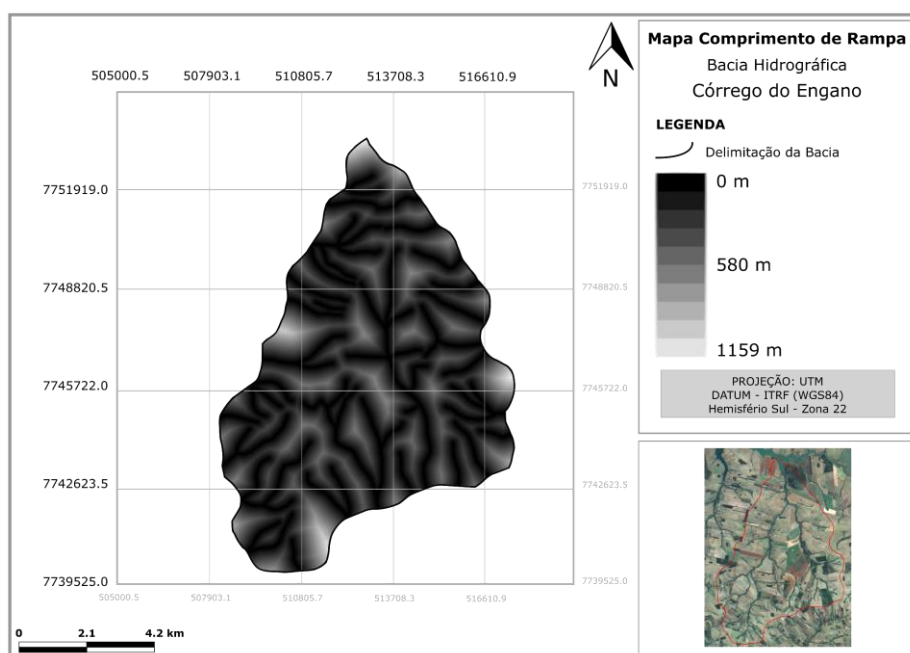
$$LS = 0,00984 C^{0,63} D^{1,18} \quad (5)$$

Onde C refere-se ao comprimento de rampa em metros e D o grau de declividade em graus.

Para a Forma de Cálculo 1 foi utilizado o mapa da Figura 17 que apresenta os valores da declividade em graus do relevo obtidos por meio do MDE do TopoData (VALERIANO, 2004) sendo está informação referente ao Fator S e o parâmetro D na Equação 5.

Em relação ao Fator L utilizou a metodologia proposta por Ruthes *et al.* (2012), que utiliza mapas MNT, curvas hipsométricas e a drenagem do local para criar uma imagem com os valores referente ao comprimento de rampa, Figura 33, sendo este o parâmetro C da Equação 5.

Figura 33 – Mapa do Fator L referente aos comprimentos de rampa para cálculo da USLE



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, as etapas para o desenvolvimento do mapa de comprimento de rampa no software SPRING consistem em: (1) edição dos divisores de água, com o valor de cota $Z=0$, para definição do início ; (2) importação do mapa de drenagem para dentro da categoria rampa do modelo numérico do terreno; (3) utilização do comando mosaico adicionando em um único plano de informação, a drenagem do local, atribuindo aos rios a função de linha de quebra, e os divisores de água como linhas cotadas; (4) Por fim, aplicação da ferramenta mapa de distâncias selecionando-se as linhas dos divisores de água, (nesta mesma categoria) como o ponto inicial gerando assim uma imagem e uma grade com os valores de comprimento de rampa (parâmetro C da Equação 05) onde a maior parte da região encontra-se na faixa de 0 – 300 metros, conforme mapa da Figura 33.

Para o cálculo final do Fator LS utilizando os valores dos parâmetros C e D desenvolveu-se um algoritmo LEGAL dentro do software SPRING para o cálculo da Equação 5 conforme organograma da Figura 34. Como resultado foi obtido uma imagem com uma grade numérica referente ao Fator LS, com valores variando entre 0 e 23,76 e a maior parte da área localizado entre 0 e 4, que será utilizado na Forma de Cálculo 1 conforme Figura 35.

Em relação a Forma de Cálculo 2, visando uma melhor representação do fator topográfico da região foram utilizadas imagens de alta resolução do Projeto de Mapeamento ALOS PALSAR (JAXA, 2008) onde há disponível modelos digitais de elevação com resolução espacial de 12,50 metros. Após obtenção do MDE referente ao local, este mapa foi importado para o SIG SAGA onde há no próprio software uma rotina de cálculo automática para o Fator LS utilizando a metodologia de Boehner e Selige (2006). Após recorte da área e cálculo segundo a metodologia citada, a grade MNT gerada foi então exportada para o SPRING onde foi possível obter o mapa do Fator LS em resolução de 12,50 metros conforme Figura 36, com valores variando entre 0,0044 e 67,18.

Na literatura foram encontrados valores semelhantes ao encontrado para as duas formas de cálculo. Em um estudo feito em São Paulo, valores variaram entre 0 e 31,20 (MEDEIROS *et al*, 2015), em outra região próxima, no estado de Mato Grosso do Sul foram encontrados valores entre 0 e 49 (BARBOSA *et al*, 2014). Por fim, em

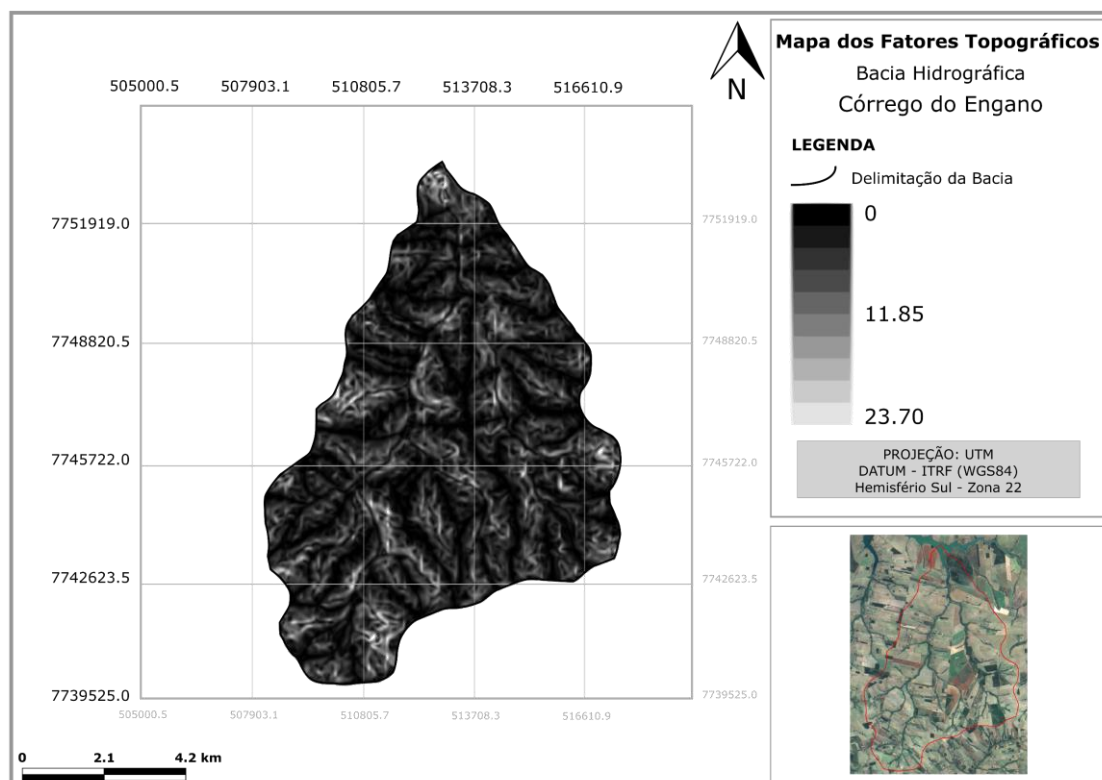
outra Bacia no noroeste paulista foram encontrados valores entre 0 e 41 (ZAPAROLI; CREMON, 2010)

Figura 34 – Organograma de cálculo para o Fator LS da forma de cálculo 1



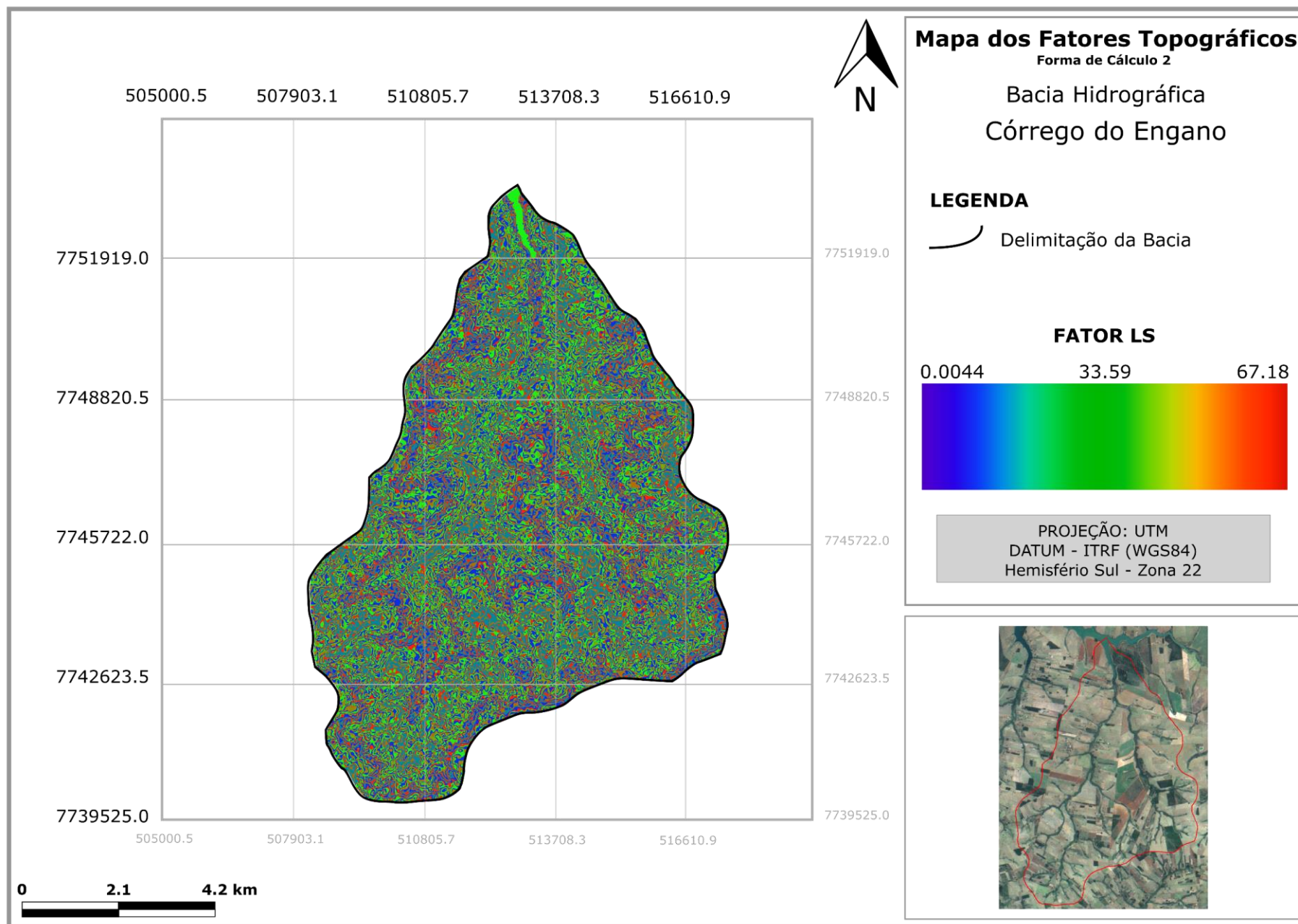
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Mapa do fator topográfico LS para a forma de cálculo 1 da USLE



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Mapa dos fatores topográficos LS a serem utilizados na forma de cálculo 2 da USLE



Fonte: Próprio autor.

3.3.1.4 Fatores de uso, ocupação e manejo dos solos (Fatores C e P)

Os fatores C e P estão diretamente relacionados com a ocupação e manejo da área sendo o Fator C relativo ao uso e o Fator P às práticas conservacionistas adotadas. Stein (1999) afirma que em avaliações regionais, os fatores uso, manejo e práticas conservacionistas só podem ser considerados genericamente, o que obriga a simplificações. Assim, para determinação dos fatores são normalmente utilizadas imagens de satélites onde é possível fazer uma classificação quanto ao tipo de uso aliado à visita em campo do local. Em relação às práticas conservacionistas, normalmente utiliza-se esse fator apenas em áreas de pequeno tamanho onde é possível um controle local maior.

Dessa forma, os valores atribuídos aos fatores C e P adotados, baseiam-se em médias anuais de alguns trabalhos, pois para algumas regiões e dependendo do tipo de vegetação, há variação sazonal da eficácia da cobertura do solo em função do estado de comportamento hídrico, existência ou não de cobertura sobre a superfície e pastagem de animais.

Por exemplo, a cultura da cana de açúcar, durante seu ciclo vegetativo semiperene, atravessa várias fases em que apresenta diferentes níveis de proteção do solo. Na fase adulta, a cultura oferece boa proteção ao solo, o que não acontece durante as etapas de plantio e início de seu desenvolvimento. Nos canaviais, porém, as áreas mais sujeitas à erosão são os carregadores entre talhões, intensamente compactados, desprovidos de cobertura vegetal e posicionados normalmente no sentido do declive (COSTA, 2005).

Em relação a Forma de Cálculo 1 foi utilizado o mapa de classificação supervisionada conforme Figura 18 atribuindo a cada uma das classes um valor referente ao fator uso e manejo (Fator C). O fator de conservação não foi adotado na Forma de Cálculo 1, a penas como forma de diferenciação entre as duas formas de cálculo. Os valores utilizados encontram-se na Tabela 27.

Quanto ao cálculo utilizando a forma de cálculo 2 partiu-se do mesmo princípio com o uso do mapa classificado presente na Figura 18, porém os valores adotados foram tanto para o Fator C quanto P de acordo dados retirados da literatura científica

de trabalhos em áreas semelhantes relacionando o tipo de uso com a prática conservacionista implementada na região, buscando, assim uma maior aproximação da realidade (GRAÇA *et al.*, 2015; BARBOSA *et al.*, 2015). Os valores utilizados encontram-se na Tabela 28. Importante notar que o valor do Fator CP de 0,5 foi adotado para solos expostos uma vez que na classificação a maior parte da área adotada como “Solo Exposto” pertence a um estágio da cultura de cana-de-açúcar onde o solo está descoberto e que coincidiu com o a imagem utilizada. Sendo assim, um valor que representaria melhor a área de solo exposto seria o utilizado para culturas semiperenes como a cana-de-açúcar.

Tabela 27 – Valores do Fator C para o uso de solo na forma de cálculo 1 da USLE

Classe	Fator C
Corpos d’água	0,0
Vegetação Rasteira	0,042
Solos Expostos	1,0
Mata e vegetação ciliar	0,012
Culturas	0,05
Urbano	0,0

Fonte: Tamazoni e Guimarães (2005); Ruhoff *et al.* (2006); OLIVEIRA *et al.* (2007)

Tabela 28 - Valores do Fator C e P para o uso de solo na forma de cálculo 2 da USLE

Classe	Fator C	Fator P	Fator C x P
Corpos d’água	0,0	0,0	0,0
Vegetação Rasteira	0,01	0,4	0,004
Solos Expostos	-	-	0,5
Mata e vegetação ciliar	0,001	0,7	0,0007
Culturas	0,5	0,5	0,25
Urbano	0,0	0,0	0,0

Fonte: Adaptado de Graça *et al.* (2015); Barbosa *et al.* (2015)

Por fim, com a junção de todas estas informações foi possível produzir o mapa de susceptibilidade, de acordo com as taxas de perda de solos determinado pela USLE, utilizando o ambiente LEGAL do programa SPRING – conforme algoritmo 2 em anexo no apêndice – o qual foi utilizado para comparação e validação com base em imagens atuais via Google Earth e com saída de campo.

3.4 Análise de susceptibilidade de processos erosivos utilizando Metodologia AHP

O processo metodológico aplicado para a criação do mapa de susceptibilidade à ocorrência de processos erosivos pelo método AHP foi feito com referência no trabalho de Silva *et al.* (2016). As notas adotadas para os graus de susceptibilidade de ocorrência de processos erosivos, conforme determinado pelo autor, estão presentes na Tabela 29 e serão utilizados para reclassificar as variáveis: tipos de solo (pedologia), precipitação, uso do solo e declividade.

Tabela 29 – Susceptibilidade de ocorrência de erosão e notas adotadas

Grau	Notas de Classe
Muito baixa	<1
Baixa	2
Média	3
Alta	4
Muito alta	5

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2016)

A primeira etapa consiste em definir a relevância de cada critério estabelecidos em relação ao outro para que cada uma seja comparado entre si, conforme a matriz de comparação par a par da Tabela 13. A definição das importâncias relativas foi adotada de acordo com estudos já realizados como em Bertoni e Neto (2008), Fushita *et al.* (2011) e Freitas *et al.* (2012) seguindo Silva *et al.* (2016). A matriz utilizada encontra-se na Tabela 30 com os fatores precipitação, pedologia, uso do solo e declividade onde ela determina quanto cada fator da esquerda é mais importante – ou não – em relação ao fator da linha superior.

Tabela 30 – Matriz de comparação par a par para os fatores analisados

Fatores	Precipitação	Pedologia	Uso do solo	Declividade
Precipitação	1	1/3	1/5	1/7
Pedologia	3	1	1/3	1/5
Uso do Solo	5	5	1	1/3
Declividade	7	5	3	1

Seguindo os valores adotadas na Tabela 29 para os graus de susceptibilidade variando entre 1 e 5 foram adotados valores para cada uma das classes a fim de

gerar um mapa de susceptibilidade erosivo com base na matriz de comparação seguindo a Equação 6.

$$\text{Susceptibilidade à Erosão} = x \cdot x_i + y \cdot y_i + z \cdot z_i + t \cdot t_i \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- x – Peso de importância do fator precipitação;
- x_i – Nota da classe precipitação (em relação a Tabela X);
- y – Peso de importância do fator pedologia;
- y_i – Nota da classe pedologia;
- z – Peso de importância do fator uso do solo;
- z_i – Nota da classe uso do solo;
- t – Peso de importância do fator declividade;
- t_i – Nota da classe declividade.

Dessa forma, para o mapa de precipitação foi adotado a nota de classe média de valor 3, devido à ausência de dados para a região onde há apenas uma estação pluviométrica próximo ao local, sendo este o motivo pelo qual o fator precipitação é que possui menos importância entre todos.

Para os tipos de solos foi adotado as classes de susceptibilidade seguindo a Tabela 6 e 29 onde as notas de classes serão respectivamente 2, 4 e 5 para os Argissolos vermelho-amarelos (PVA1), Argissolos Vermelhos (PV4) e os Gleissolos Háplicos (GX5).

Com relação a declividades, utilizou como base a Tabela 2 para a criação da Tabela 31 com uma divisão entre as classes de declividades e sua respectiva influência na ocorrência de processos erosivos conforme a nota de classe da Tabela 29.

Tabela 31 – Divisão das classes de influência para a declividade

Influência	Declividade (%)	Nota
Muito Baixa	< 2	1
Baixa	2 – 6	2
Média	6 – 20	3
Alta	20 – 50	4
Muito alta	> 50	5

Para o fator de uso do solo, foi utilizada como base a Tabela 4 que classifica a fragilidade da área de acordo com o tipo de cobertura e adotando as notas de classes de acordo com a imagem classificada e elaborar a Tabela 32 a seguir.

Tabela 32 – Divisão de classes para o uso e ocupação do solo

Classe de Uso	Nota
Corpos d'água	1
Vegetação Rasteira	2
Solos Expostos	4
Mata e vegetação ciliar	1
Culturas	3
Urbano	1

Fonte: Próprio autor.

Para confecção final do mapa de susceptibilidade é necessário a atribuição de pesos para cada um dos diferentes fatores seguindo a matriz de comparação par a par obtendo assim a Tabela 33 a seguir.

Tabela 33 – Matriz de comparação par a par com os pesos para cada fator

Fatores	Precipitação	Pedologia	Uso do solo	Declividade	Peso de Importância
Precipitação	1	0.33	0.2	0.14	0.055022
Pedologia	3	1	0.33	0.2	0.117786
Uso do Solo	5	5	1	0.33	0.263378
Declividade	7	5	3	1	0.563813

Fonte: Próprio autor.

Conforme mencionado anteriormente, estes valores devem ser verificados com base na Razão de Consistência (Rc) onde, de acordo com Eastman (2005) a razão deve ser menor que 10% para estar dentro de um limiar aceitável em relação aos pesos de importância, sendo obtida pela seguinte equação:

$$Rc = (IC/IR) \quad (7)$$

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n-1) \quad (8)$$

Onde:

IC – índice de consistência;

IR – índice de consistência randômico (0,9 para n = 4)

λ_{max} – autovalor máximo

n – número da ordem da matriz

Ao aplicar-se as equações anteriores chega-se ao resultado de 0,438% sendo menor que o valor sugerido para validação dos pesos.

Em seguida, é feita a substituição dos pesos na Equação 6, sendo a equação final a ser implementada em um algoritmo para obtenção do mapa final de fragilidade representado por:

$$\text{Susceptibilidade a Erosão} = 0.055 \cdot x_i + 0.1178 \cdot y_i + 0.2634 \cdot z_i + 0.5638 \cdot t_i$$

Por fim, com a utilização de uma rotina em LEGAL no programa SPRING, conforme algoritmo 3 no apêndice, é possível fazer uma álgebra de mapas de acordo com a Equação 6 já considerando os pesos adotados e cada nota dada aos fatores gerando um mapa final dividido em 5 diferentes classes variando de acordo com os valores da Tabela 29. Por exemplo, em uma área com solo PV4 (4), declividade média (3), solo com vegetação rasteira (2) e chuva constante (3) o cálculo a ser realizado pelo algoritmo LEGAL seria: $\text{Suscp. Eros.} = 0.055 \cdot 3 + 0.1178 \cdot 4 + 0.2634 \cdot 2 + 0.5638 \cdot 3 = 2,85$, estando próximo ao grau médio de probabilidade de ocorrência de processo erosivos nessa área. Dessa forma, o mapa obtido foi utilizado para comparação e validação com base em imagens atuais via Google Earth e saída de campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Mapa de vulnerabilidade seguindo a metodologia VNE

A carta de vulnerabilidade da região do Córrego do Engano foi obtida seguindo a metodologia descrita anteriormente com a junção e ponderação das 5 classes (geomorfologia, geologia, pedologia, clima e uso/ocupação) conforme média aritmética proposta pela Equação 3. O mapa final foi elaborado conforme os graus de vulnerabilidade da Tabela 14. A associação dos temas foi realizada utilizando um algoritmo em LEGAL (conforme algoritmo 1 no apêndice) que possibilitou elaborar uma grade numérica retangular com valores variando entre 1,43 e 2,37 na escala de vulnerabilidade, ou seja, na faixa entre moderadamente estável e moderadamente vulnerável, conforme Figura 37, para a divisão entre classes, e Figura 38, para a divisão de acordo com o espectro visível de cores.

A Figura 37, com a divisão entre as classes conforme Tabela 19, possibilita uma visualização com aspecto uniforme da área, pois os espaçamentos entre os valores na escala englobam um maior número de valores, generalizando as características da área. Por outro lado, a divisão em escala de cores (Figura 38), possibilita verificar as variações mais sutis que ocorrem por toda a região. Ao comparar-se as duas classificações, percebe-se que a maior área da bacia se enquadra no limiar superior da classe intermediária com valores entre 2,05 e 2,30 que condiz com o contraste variando entre verde escuro, amarelo e vermelho conforme mapa.

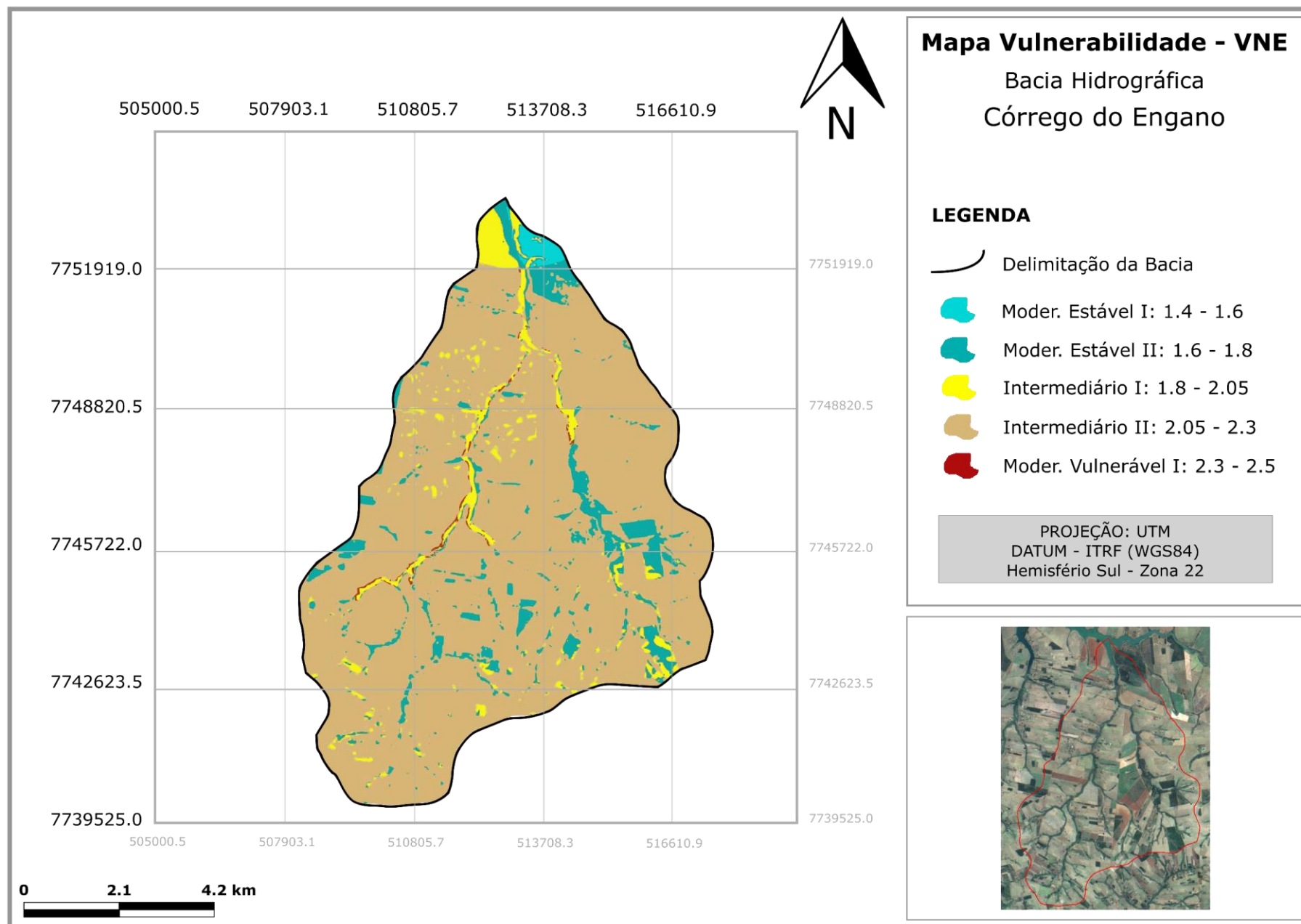
Ainda, com o mapa de vulnerabilidade é possível quantificar as classes referente aos diferentes graus de vulnerabilidade, determinando a área que cada um ocupa na bacia, conforme Tabela 34.

Tabela 34 - Medida de classes

Classe	Escala de Vuln.	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Moderadamente Estável I	1,4 – 1,6	0,621	0,854
Moderadamente Estável II	1,6 – 1,8	5,518	7,591
Intermediário I	1,8 – 2,05	3,466	4,768
Intermediário II	2,05 – 2,3	62,45	85,912
Moderadamente Vulnerável I	2,3 – 2,5	0,278	0,382
Total		72,69	100

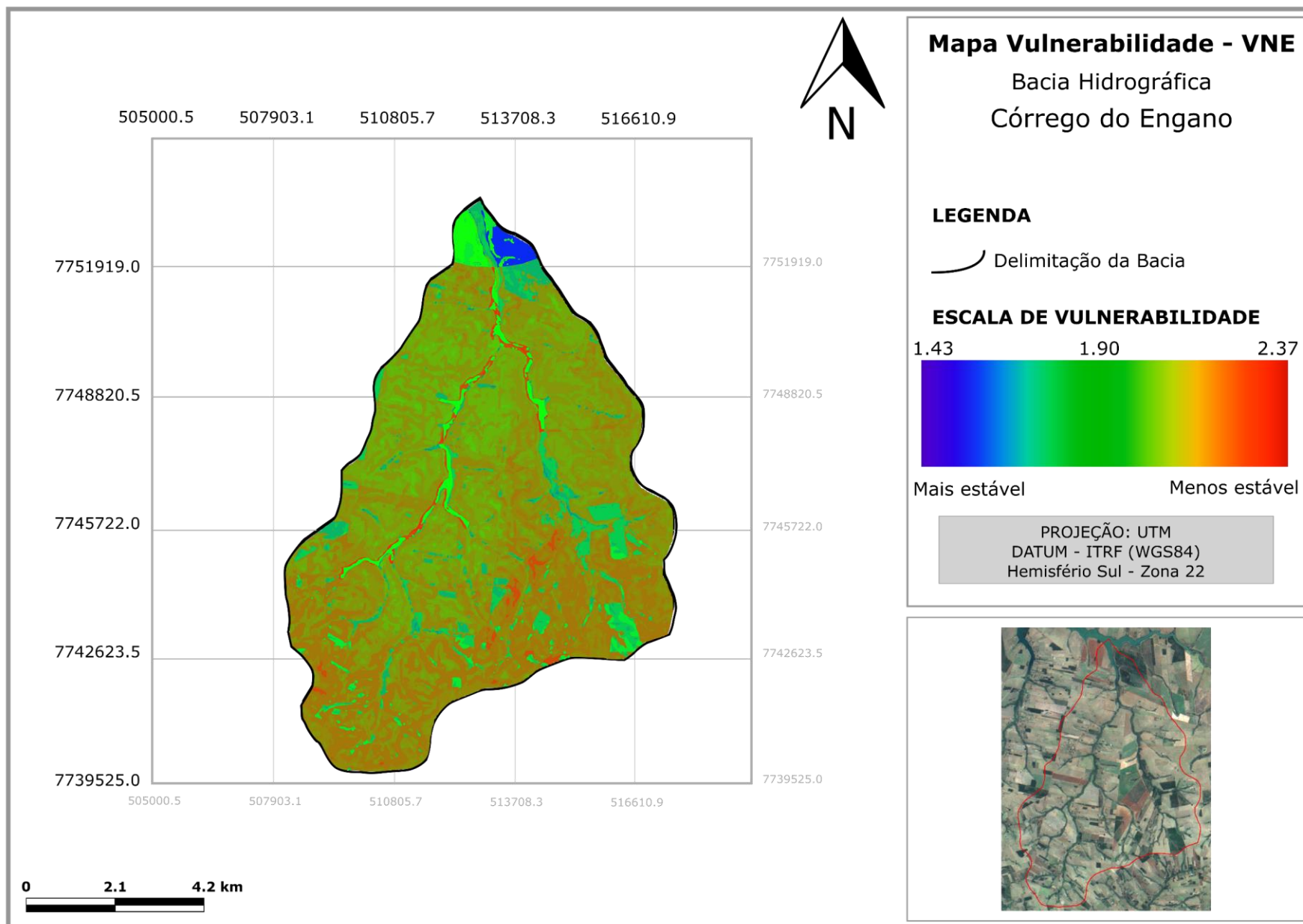
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Mapa de vulnerabilidade VNE com divisões em classes de vulnerabilidade



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Mapa de vulnerabilidade VNE com divisões em cores do espectro do visível



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 34, a classe predominante em 85,91% da área da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano é o Intermediário II com valores entre 2,05 e 2,30 de acordo com a classificação de Crepani *et al.* (2001). Essa região sofre bastante influência da litologia, clima e solos que possuem faixas com características intermediárias que estão predominantemente sobre esta região. As classes mais estáveis encontram-se próximas ao exutório da bacia – principalmente devido à presença de rochas que favorecem uma maior estabilidade da geologia nessa área – e espalhados por toda a região em locais com vegetação densa. Os valores extremos – entre o limiar superior da classe intermediária e a moderadamente vulnerável – encontram-se principalmente próximos à rede de drenagem e em alguns pontos à montante onde há predominância de áreas com solo exposto e grandes declives, que propiciam áreas de maior vulnerabilidade.

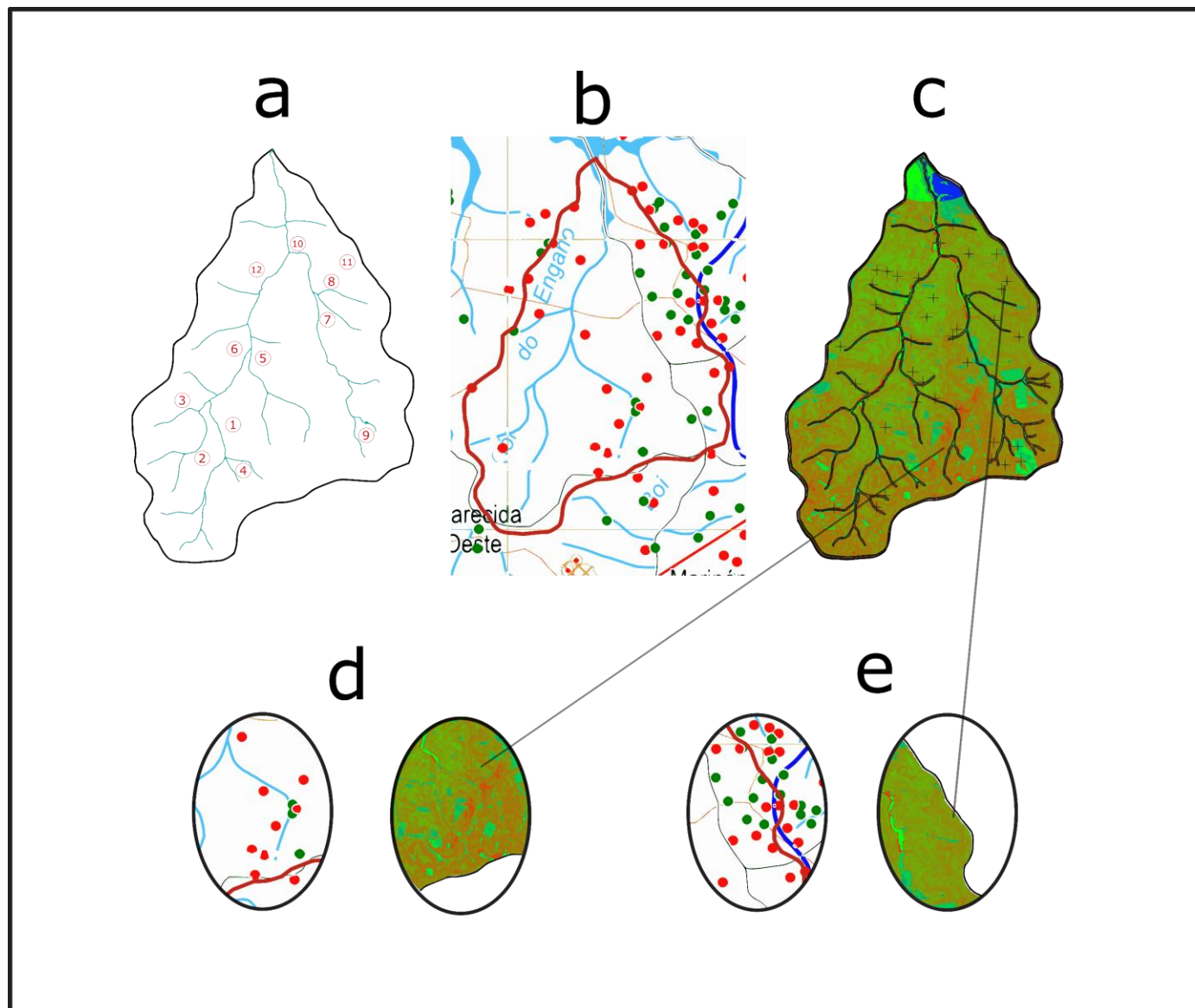
4.1.2 Comparação com pontos de feições erosivas conhecidos no local

Com base nas Figura 21 e 22, onde foram alocados alguns pontos de processo erosivos visualizados por imagens de satélites e pelo SigRH e IPT, percebe-se uma grande distribuição de feições erosivas por toda a bacia, exceto próximo ao exutório que possui características de baixa vulnerabilidade, segundo metodologia de Crepani *et al* (2001).

A Figura 39 a seguir apresenta lado a lado os pontos de feições erosivas obtidas por imagens de satélites de 2018 (Figura 39a), pontos alocados pelo relatório SigRH (Figura 39b) e o mapa de vulnerabilidade com escala no espectro do visível (Figura 39c) para uma melhor comparação.

Um local com maior concentração de pontos, com base na Figura 39, fica ao leste próximo à rede de drenagem, sendo uma área com característica Intermediário de vulnerabilidade no patamar superior, sendo evidente uma maior concentração de áreas vermelhas, indicando um valor alto de fragilidade. Outra região de considerável vulnerabilidade é a parte centro-sul onde percebe-se, conforme Figura 39d, diversos pontos próximos a um dos braços de drenagem que fazem parte de uma área sensível, conforme Figura 39e.

Figura 39 – Comparações entre a metodologia Crepani *et al.* (2001) e os pontos alocados para a área. (a) pontos visualizados por imagens de satélites; (b) pontos presentes no relatório SigRH; (c) mapa de estabilidade da área; (d) e (e) comparação entre áreas



Fonte: Próprio autor.

4.2 Apresentação dos mapas de estimativas perda de solo e classes de potencial erosivo conforme as duas formas de cálculo da USLE

Os mapas de perda de solo e probabilidade à ocorrência de processos erosivos na região do Córrego do Engano foi obtida seguindo a metodologia descrita anteriormente de acordo com as duas formas de cálculo adotadas (Figura 29) utilizando a Equação Universal da Perda de Solo (Equação 1) onde foi multiplicado os mapas dos 4 diferentes fatores (erodibilidade, erosividade, topográficos e de uso e manejo) utilizando uma algoritmo escrito conforme programação LEGAL dentro do programa SPRING (apêndice).

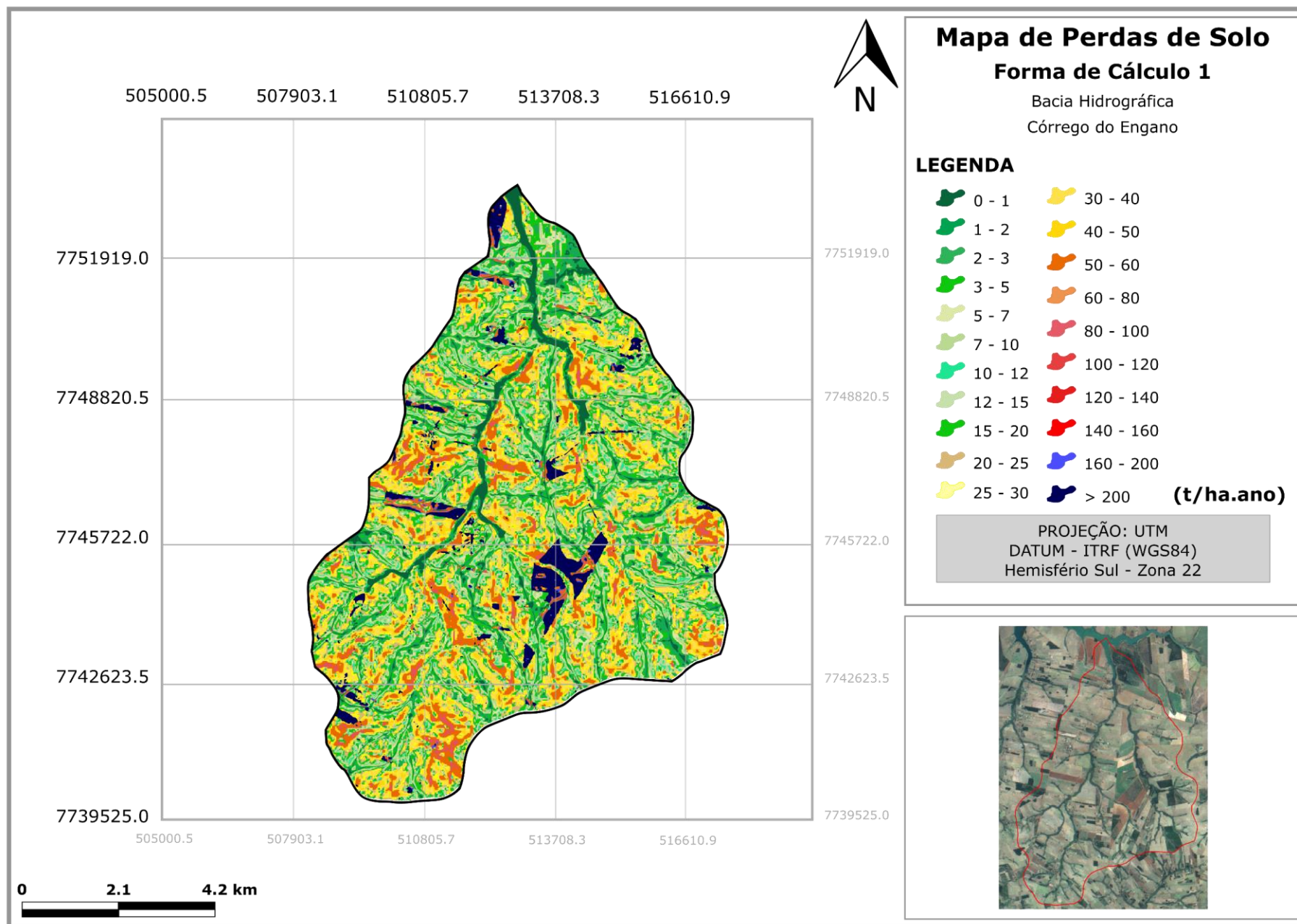
O mapa final da perda de solos para a Forma de Cálculo 1 variou entre 0 e 295,05 (t/ha.ano), sendo que valores menores que 80,00 (t/ha.ano) correspondem a 93.33% da área da bacia (67,63 km²). Para melhor visualização do mapa, a área foi dividida em 21 classes conforme Tabela 35, enquanto que o mapa com as 21 divisões encontra-se na Figura 40.

Tabela 35 – Perda de solo e área ocupado para primeira forma de cálculo da USLE

Perda de Solo (t/ha.ano)	Área ocupada (km ²)	Porcentagem da área (%)
0 - 1	3,36	4,64
1 - 2	2,22	3,07
2 - 3	2,35	3,25
3 - 5	4,83	6,67
5 - 7	4,54	6,27
7 - 10	5,95	8,22
10 - 12	3,52	4,86
12 - 15	4,74	6,55
15 - 20	7,14	9,86
20 - 25	6,10	8,43
25 - 30	5,21	7,20
30 - 40	7,77	10,74
40 - 50	4,68	6,47
50 - 60	2,73	3,77
60 - 80	2,55	3,52
80 - 100	0,85	1,17
100 - 120	0,35	0,48
120 - 140	0,18	0,25
140 - 160	0,12	0,17
160 - 200	0,23	0,32
>200	2,96	4,09
Total	72,66	100

Fonte: Próprio autor.

Figura 40 – Mapa de Estimativas de Perdas de Solos para a primeira forma de cálculo da USLE



Fonte: Próprio autor.

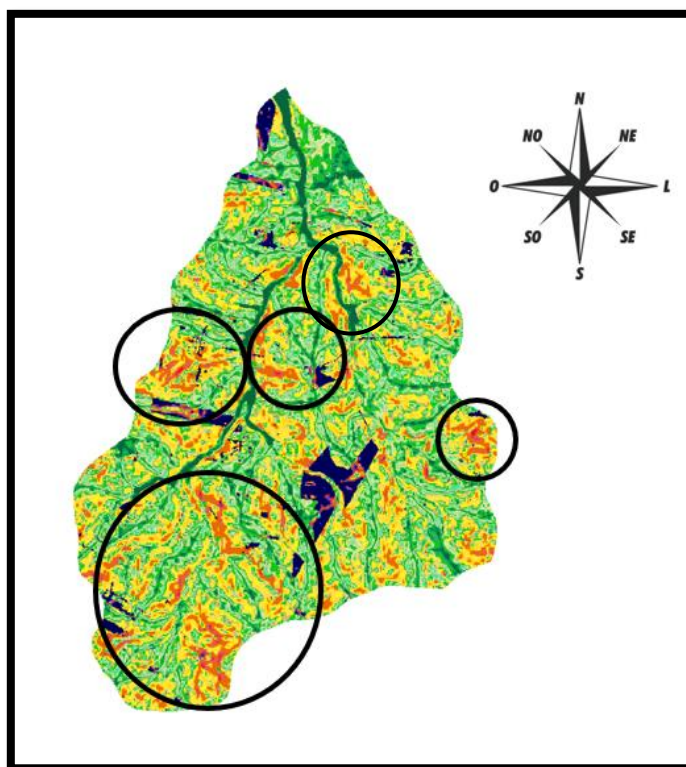
Analisando-se o mapa da perda de solo para a Forma de Cálculo 1 percebe-se que o método forneceu valores maiores considerando o tipo de solo do local e a tolerância de perda de solo. Por exemplo, na maior parte da Bacia há a predominância de Argissolos Vermelhos que possuem uma tolerância de perda de até 9,0 toneladas por hectares sendo que menos de 33% da Bacia possui perda menor que 9,0 toneladas por hectare, indicando o potencial erosivo da área com base na perda de solo e tolerância de perda (LIMA *et al.*, 2016).

De acordo com a Figura 40 a área ao exutório da bacia é a que visualmente possui a maior concentração de regiões com menores valores de perda de solo, principalmente devido às características do solo e o fator topográfico nessa área. No restante da bacia, percebe-se um padrão homogêneo onde há locais com concentração de áreas com grandes valores de perda de solos próximos a locais com pouco. Isso se deve principalmente ao fator topográfico e sua frequente variação em toda a região. Isso ocorre devido ao comprimento de rampa e a declividade onde pontos próximos ao corpo de drenagem tende a ser maiores diminuindo até o ponto mais alto do relevo, conforme metodologia de cálculo adotada.

Quanto às regiões com os maiores valores de perda de solos, percebe-se que se concentram em 4 locais diferentes: a oeste em uma pequena área próxima ao limite da bacia, a leste em outra pequena área também próxima ao limite, no centro da bacia e ao sul ocupando uma grande área, conforme Figura 41.

Analisando os influenciadores, essas áreas são as que possuem os maiores valores do fator topográfico aliando grande comprimentos de rampas juntamente com altas declividades influenciando diretamente no valor da perda de solos nesses locais. Importante notar que algumas regiões em azul escuro, como no centro-sudeste, foram áreas classificadas como solo exposto, porém devido à cultura de cana-de-açúcar essa situação é apenas temporária o que não necessariamente retrata a atual situação dessas áreas sendo possivelmente o influenciador no alto valor encontrado para o limiar alto da perda de solos utilizando a Forma de Cálculo 1.

Figura 41 – Cluster de regiões com maior perda de solo para o primeiro cálculo



Fonte: Próprio autor.

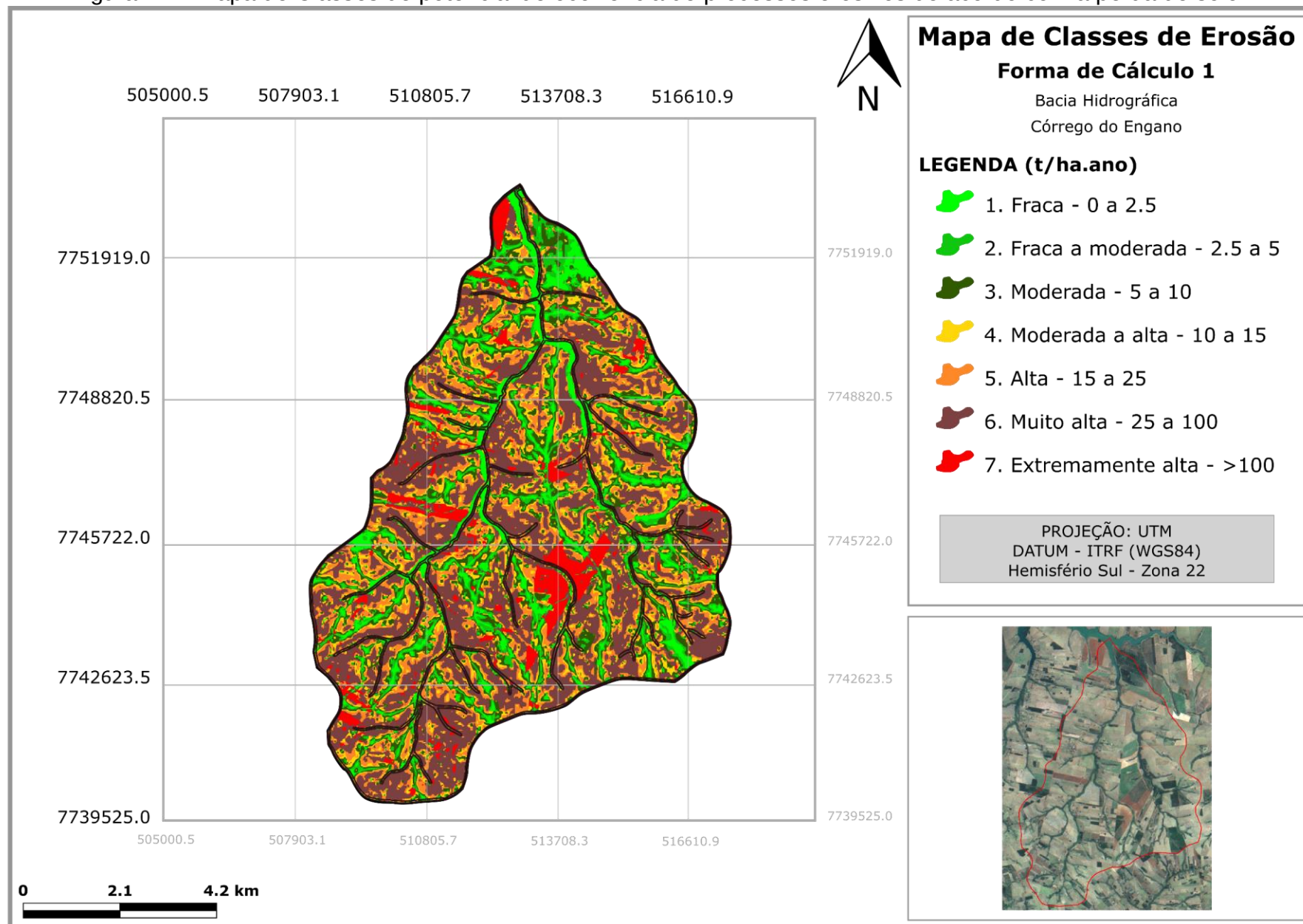
Devido às considerações já mencionadas sobre a aplicação da USLE em grandes áreas, os resultados são interpretados de forma qualitativa quanto ao potencial/probabilidade de ocorrência da erosão. Dessa forma, Beskow *et al.* (2009) apresentou uma classificação para visualmente facilitar a avaliação da área dividindo em classes as perdas de solo variando entre ligeiramente e extremamente alta quanto à probabilidade de ocorrência de erosões, conforme Tabela 36, onde estão separadas as classes e a quantificação da área em que ocupa e a Figura 42 com a classificação de acordo com a proposta de Berskow *et al.* (2009).

Tabela 36 – Subdivisões da perda de solo conforme seu potencial em causar processos erosivos

Classes	Perda de Solo (t/ha.ano)	Área ocupada (km²)	Porcentagem da área (%)
Ligeira	0 – 2.5	6,75	9.31
Ligeira a Moderada	2.5 - 5	6,03	8.32
Moderada	5 - 10	10,50	14.49
Moderada a alta	10 - 15	8,27	11.41
Alta	15 - 25	13,25	18.28
Muito alta	25 - 100	23,82	32.86
Extremo	> 100	3,86	5.33
Total		72,66	100

Fonte: Próprio autor.

Figura 42 – Mapa de Classes de potencial de ocorrência de processos erosivos de acordo com a perda de solo



Fonte: Próprio autor.

De forma geral, observa-se na região a predominância das classes “Alta” e “Muito Alta” principalmente entre os cursos dos rios em pontos baixos onde o valor do comprimento de rampa é maior que aliado à declividade propicia altos valores do Fator LS. Além disso, é importante ressaltar que contrário à Fórmula de Cálculo 2, não foi adotado valores de P para as classes de uso de solo, o que pode ter majorado a perda de solos, o que era esperado. As classes mais baixas – entre “Ligeira” e “Moderada” – ocupam 32,12% da área e tem o seu valor reduzido principalmente devido ao pequeno valor do Fator C para pastagem e vegetação nativa, sendo nítido próximo ao norte da bacia.

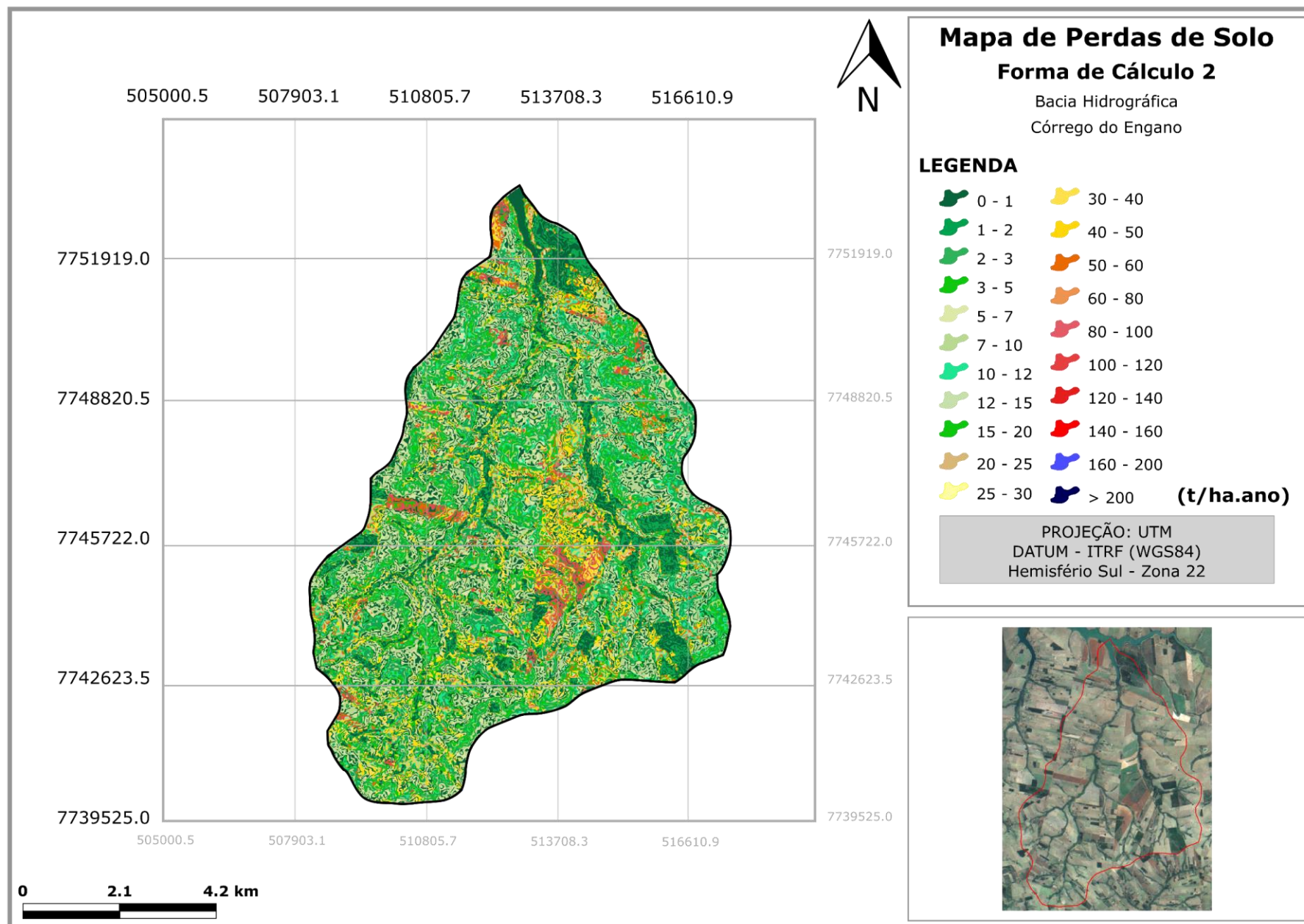
Com relação ao mapa final da perda de solos para a Forma de Cálculo 2 os valores encontrados variaram entre 0 e 156,07 (t/ha.ano), sendo que valores menores que 80,00 (t/ha.ano) correspondem a 97,06% da área da bacia (70,52 km²). Para melhor visualização do mapa, a área foi dividida em 21 classes conforme Tabela 37, enquanto que o mapa com as 21 divisões encontra-se na Figura 43, do mesmo modo que a primeira forma de cálculo.

Tabela 37 - Perda de solo e área ocupado para segunda forma de cálculo da USLE

Perda de Solo (t/ha.ano)	Área ocupada (km ²)	Porcentagem da área (%)
0 - 1	14,80	20.43
1 - 2	8,30	11.46
2 - 3	3,75	5.18
3 - 5	6,65	9.18
5 - 7	6,40	8.83
7 - 10	12,92	17.84
10 - 12	5,18	7.15
12 - 15	1,17	1.62
15 - 20	1,39	1.92
20 - 25	0,95	1.31
25 - 30	1,04	1.44
30 - 40	2,35	3.24
40 - 50	3,67	5.07
50 - 60	1,73	2.39
60 - 80	0,48	0.66
80 - 100	0,43	0.59
100 - 120	0,63	0.87
120 - 140	0,52	0.72
140 - 160	0,08	0.11
Total	72,66	100

Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Mapa de Perdas de Solos para a segunda forma de cálculo da USLE



Fonte: Próprio autor.

Semelhante a Fórmula de Cálculo 1 ao analisar o mapa da perda de solo para a Forma de Cálculo 2 percebe-se que o método também forneceu valores condizentes com o esperado para região conforme o tipo de solo do local com um maior detalhe principalmente devido ao fator LS advir de um mapa com maior resolução proporcionado maior heterogeneidade na região de estudo.

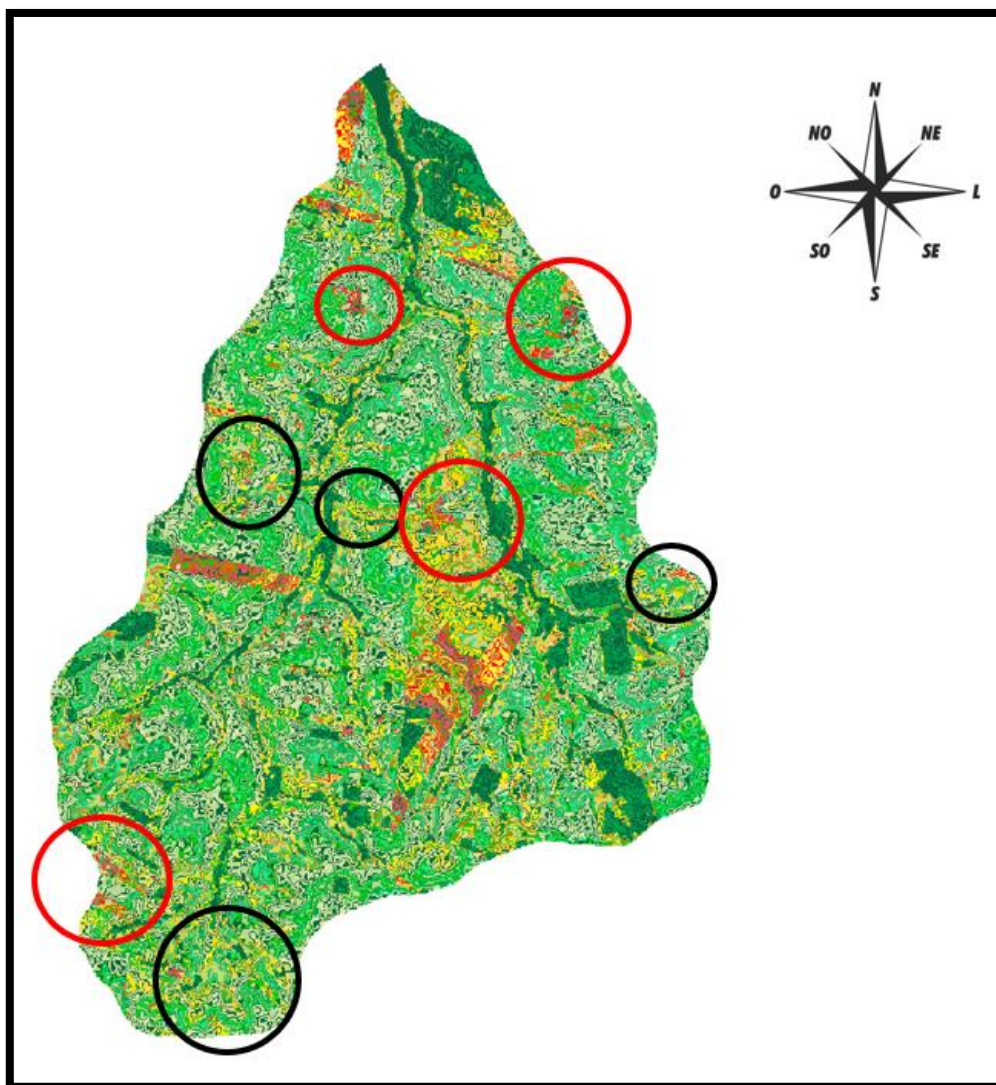
De acordo com a Figura 43 a área ao exutório da bacia, semelhante à Figura 40, é a que visualmente possui a maior concentração de regiões com menores valores de perda de solo. No restante da bacia, percebe-se um padrão heterogêneo com poucas regiões onde há a concentração de manchas com valores similares de perda de solo conforme observado no mapa gerado pela Forma de Cálculo 1 onde há locais com concentração de áreas com grandes valores de perda de solos. Isso se deve principalmente devido a resolução do mapa onde não há uma generalização das áreas - excetuando-se as grandes áreas de cultura de cana de açúcar e reserva que possuem um padrão mais similar. Essa diferença entre as formas de cálculo é certamente uma vantagem para a Forma de Cálculo 2 uma vez que o mapa gerado possui uma resolução que permite o trabalho direto de soluções de proteção do solo em pequenas áreas, uma vez que é possível diferenciar qual o fator que está causando problemas em pequenas áreas aplicando a devida correção local a nível de pequenas propriedades.

Quanto às regiões com os maiores valores de perda de solos – e com exceção das áreas de cultura semi-perenes - percebe-se, novamente, que se concentram nos mesmo 4 locais que a Forma de Cálculo 1 além de 4 outros novos locais: a sudoeste próximo à divisa, ao nordeste, no centro-noroeste e centro, conforme Figura 44. É importante notar que ao comparar o resultado da Forma de Cálculo 1 e 2, as áreas com alta perda de solo, ainda que visualmente continuando no mesmo local, foram reduzidas em área devido ao detalhe da Forma de Cálculo 2 diminuindo a generalização de resultados, facilitando saber exatamente onde encontram-se áreas que demandam uma maior atenção quanto à problemática de erosões.

Em relação aos fatores influenciadores, devido ao nível de detalhe da grade gerada todos tiveram grande influência no valor de perda de solo, sendo o uso e manejo de acordo com a classe de ocupação do solo o fator responsável por deixar algumas áreas com características semelhantes, como as matas, pastagem e cultura

semi-perenes (cana-de-açúcar). Sendo assim, excetuando-se as áreas de várzeas, reservas e cultura, o restante do mapa apresentou comportamento extremamente heterogêneos, conforme citado anteriormente, facilitando o estudo em pequenas áreas devido à especificidade do resultado.

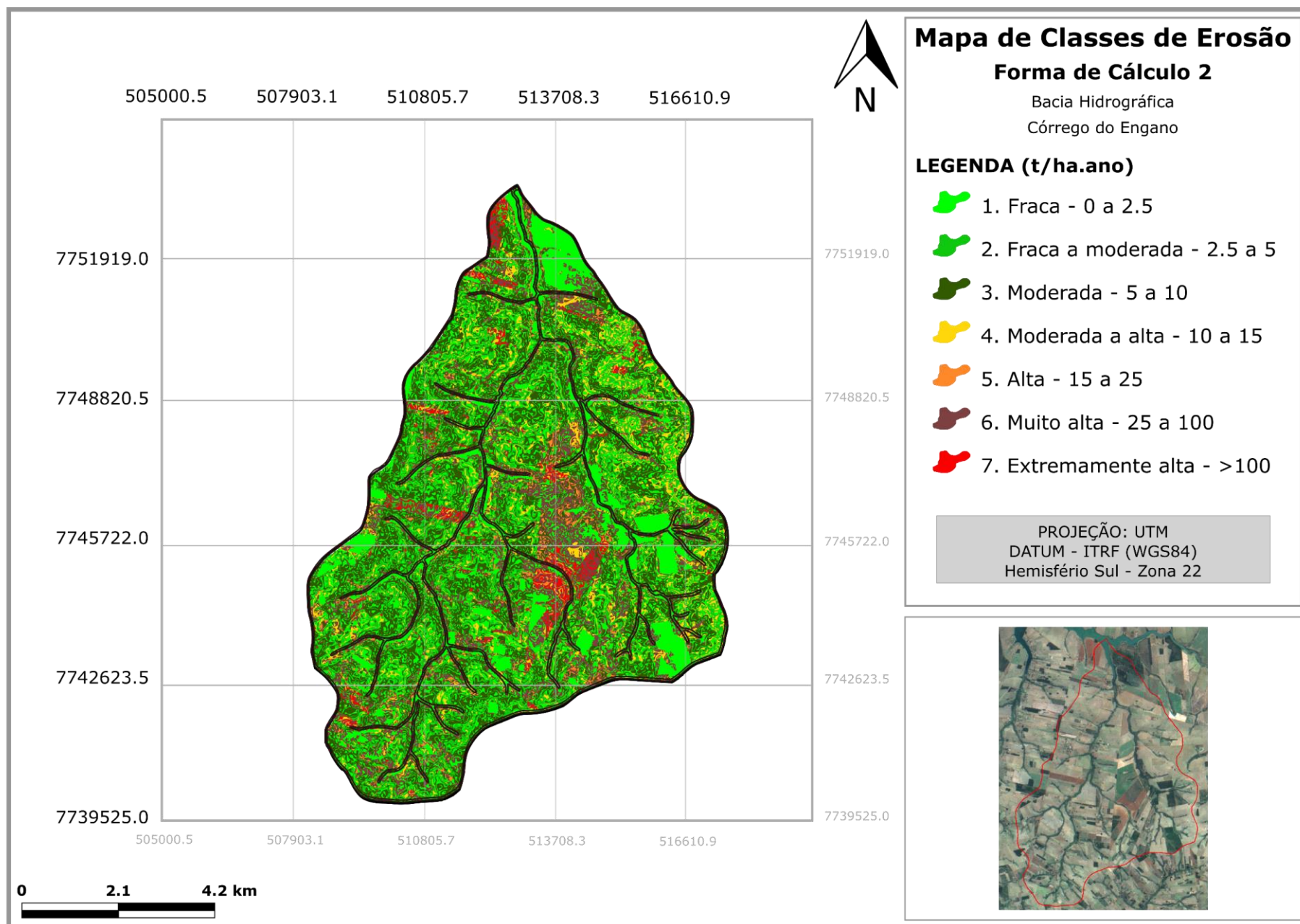
Figura 44 - Regiões com maior perda de solo para o segundo cálculo



Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma, foi apresentada um mapa avaliação da área dividindo em classes as perdas de solo variando entre ligeiramente e extremamente alta quanto à probabilidade de ocorrência de erosões, conforme Tabela 38, onde estão separadas as classes e a quantificação da área em que ocupa e a Figura 45 com a classificação de acordo com a proposta de Berskow *et al.* (2009)

Figura 45 - Mapa de Classes de potencial de ocorrência de processos erosivos de acordo com a perda de solo



Fonte: Próprio autor.

De forma geral, observa-se na região a predominância das classes “Ligeira” e “Moderada”, sendo a primeira principalmente entre os cursos dos rios e áreas de mata nativa e a segunda em áreas de pastagem com fator topográfico alto onde há predominância de valores acentuados de declividade e comprimento de rampa (MORINAGA e RUEDA, 2015; CARVALHO *et al.*, 2010). Conforme dito anteriormente, os valores utilizados para o Fator CP da equação da USLE utilizado na Forma de Cálculo 2 adotou valores conhecidos de métodos comumente utilizados de proteção – práticas conservacionistas - ao solo de acordo com alguns tipos de uso retirados da literatura o que certamente propiciou a predominância de classes menores que “Moderada”.

Tabela 38 - Subdivisões da perda de solo conforme seu potencial em causar processos erosivos para a segunda forma de cálculo da USLE

Classes	Perda de Solo (t/ha.ano)	Área ocupada (km²)	Porcentagem da área (%)
Ligeira	0 – 2.5	25,07	34.60
Ligeira a Moderada	2.5 - 5	8,42	11.62
Moderada	5 - 10	19,32	26.67
Moderada a alta	10 - 15	6,35	8.76
Alta	15 - 25	2,35	3.24
Muito alta	25 - 100	9,71	13.40
Extremo	> 100	1,23	1.70
Total		72,66	100

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos através das duas formas de cálculos adotadas para o USLE demonstraram a importância de uso e manejo do solo, uma vez que outros importantes fatores – como o topográfico – são improváveis quanto ao custo serem alterados, juntamente com as características dos 3 tipos de solos encontrados na área. Sendo assim, o tipo de uso adotada e as práticas conservacionistas são as principais práticas que poderão reduzir a probabilidade de ocorrência de processos erosivos, especialmente em áreas de pastagem com grande comprimento de rampa, declividade e falta de mata nativa.

Além disso, esse tipo de classificação potencial de ocorrência, aliado a um SIG permite facilmente analisar o grau de impacto que determinada prática irá provocar na área de estudo. Pode-se facilmente no ambiente SIG adotar diferentes valores dos

fatores C e P para verificar qual o melhor uso e manejo a ser adotado na área considerando os outros fatores imutáveis fazendo uma projeção da intensidade da perda de solo. Sendo assim, a Forma de Cálculo 2 é mais indicado uma vez que a resolução espacial de 12,50 metros permite uma avaliação mais detalhada de pequenas áreas fornecendo informações de práticas conservacionistas a pequenos proprietários reduzindo custo de consultoria à pequenas propriedades quanto ao manejo do solo.

Em resumo, o resultado obtido para a Equação Universal da Perda de Solo utilizando a Forma de Cálculo 1 forneceu resultados de forma mais abrangente – como esperado – sendo um ótimo material base para estudo e avaliações em maior escala considerando grandes áreas onde é possível aplicar o melhor método de conservação buscando a proteção contra processos erosivos para uma grande região dentro dessa bacia. Por outro lado, a Forma de Cálculo 2 mostrou resultados mais específicos para pequenas áreas sendo um ótimo material para aplicação de método de correção e proteção do solo em escala de pequenas propriedades rurais (ranchos, sítios, fazendas etc.) sendo possível verificar a problemática local buscando soluções bem específicas com relação às práticas conservacionistas. Importante notar que mesmo considerando o valor do Fator P para a Forma de Cálculo 2 ainda se obteve valores altos para a perda de solo na região, o que indica que o tipo de prática adotada para aquele tipo de classe de uso não está sendo suficiente para reduzir a probabilidade de ocorrência de processos erosivos.

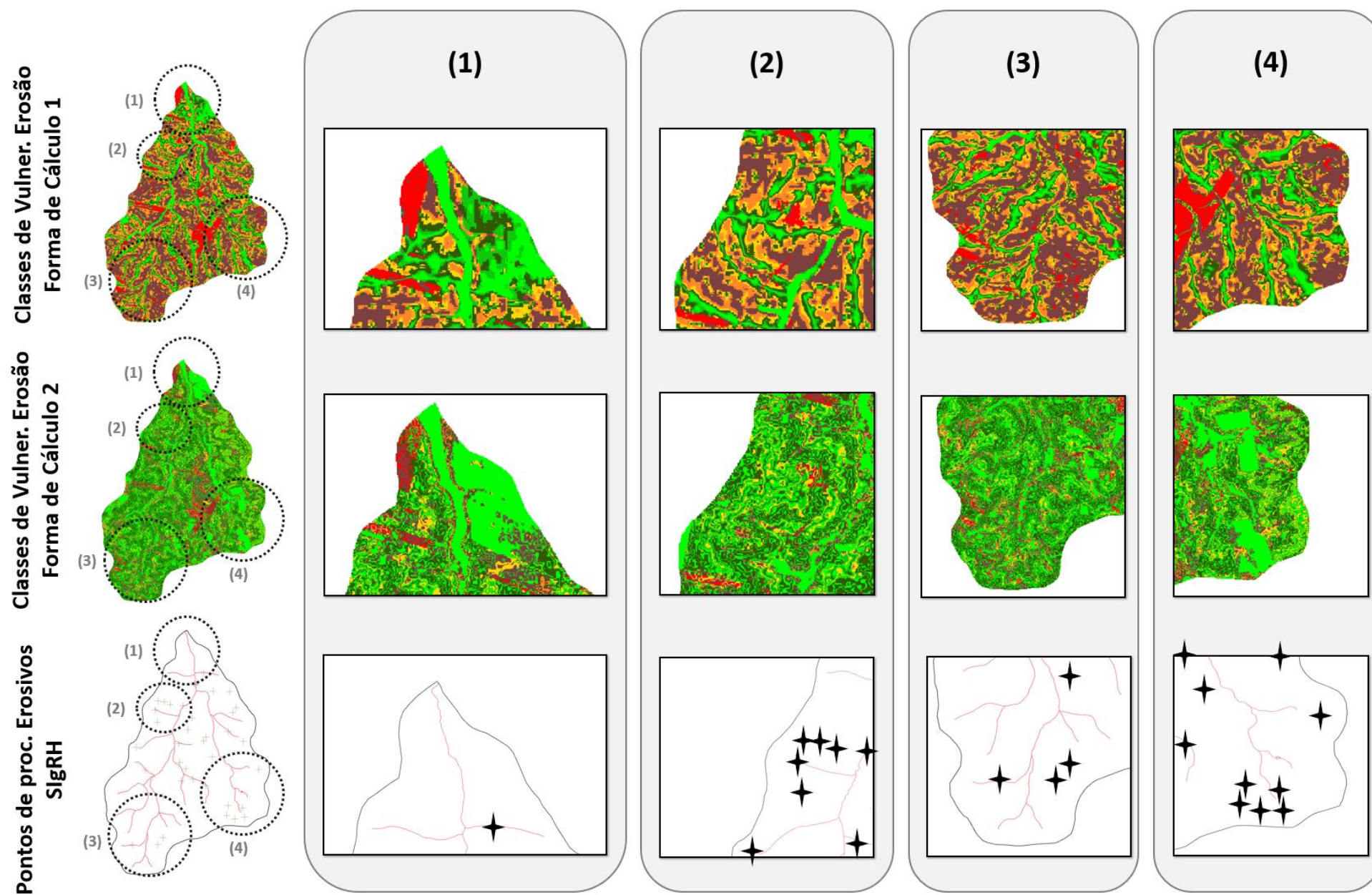
4.2.1 Comparação com pontos de feições erosivas conhecidos no local – USLE

A Figura 46 apresenta uma comparação lado a lado do resultado obtido utilizando a equação da USLE após separação das classes de acordo com probabilidade de ocorrência de processos erosivos com pontos conhecidos alocados dentro da bacia de acordo com o relatório do SigRH conforme citado anteriormente.

Foi feito a separação em 4 blocos onde há semelhanças e características importantes a serem comentadas. Na região (1), que corresponde ao norte da bacia, ambas as formas de cálculo – com exceção da região em vermelho devido ao estágio

de solo exposto em uma cultura de cana-de-açúcar e outras pequenas áreas moderadas – classificaram à área como ligeiramente susceptível ao aparecimento de processos erosivos, o que corresponde com a ausência de pontos no relatório.

Figura 46 – Comparações pontuais entre as duas formas de cálculo da USLE



Fonte: Próprio autor.

Entretanto, importante notar que ambas as formas de cálculo encontraram pequenas regiões que devem ser dada a devida atenção, mesmo com ausência de processos erosivos catalogados.

Com relação às regiões (2), (3) e (4), todas elas apresentam semelhanças com a presença de regiões variando entre todas as classes com pontos extremamente vulneráveis de acordo com os dois métodos o que corresponde com o relatório uma vez que essas três regiões são áreas com grande concentração de pontos de processos erosivos catalogados.

Importante ressaltar, novamente, a diferença entre as duas formas de cálculo onde é notável a generalização da primeira forma onde as áreas mais frágeis abrangem uma quantidade maior de solo enquanto a segunda forma de cálculo é mais específica, porém é nítido que as áreas extremas aparecem em destaque em ambos os mapas.

4.3 Apresentação do mapa de susceptibilidade à ocorrência de erosão conforme o método AHP

Após atribuição das notas de classes para cada um dos fatores seguindo a sua fragilidade em relação ao estudo de erosão e utilizando o peso de importância conforme Tabela 39 a seguir foi possível por meio de álgebra de mapas e a rotina de programação do SIG SPRING gerar o mapa de susceptibilidade de ocorrência a erosão conforme Figura 47 a seguir dividida entre 5 classes variando entre muito baixa e muito alta sendo a quantificação de cada classe mostrada na Tabela 39.

Tabela 39 – Grau de susceptibilidade e área ocupado obtido pelo Método AHP

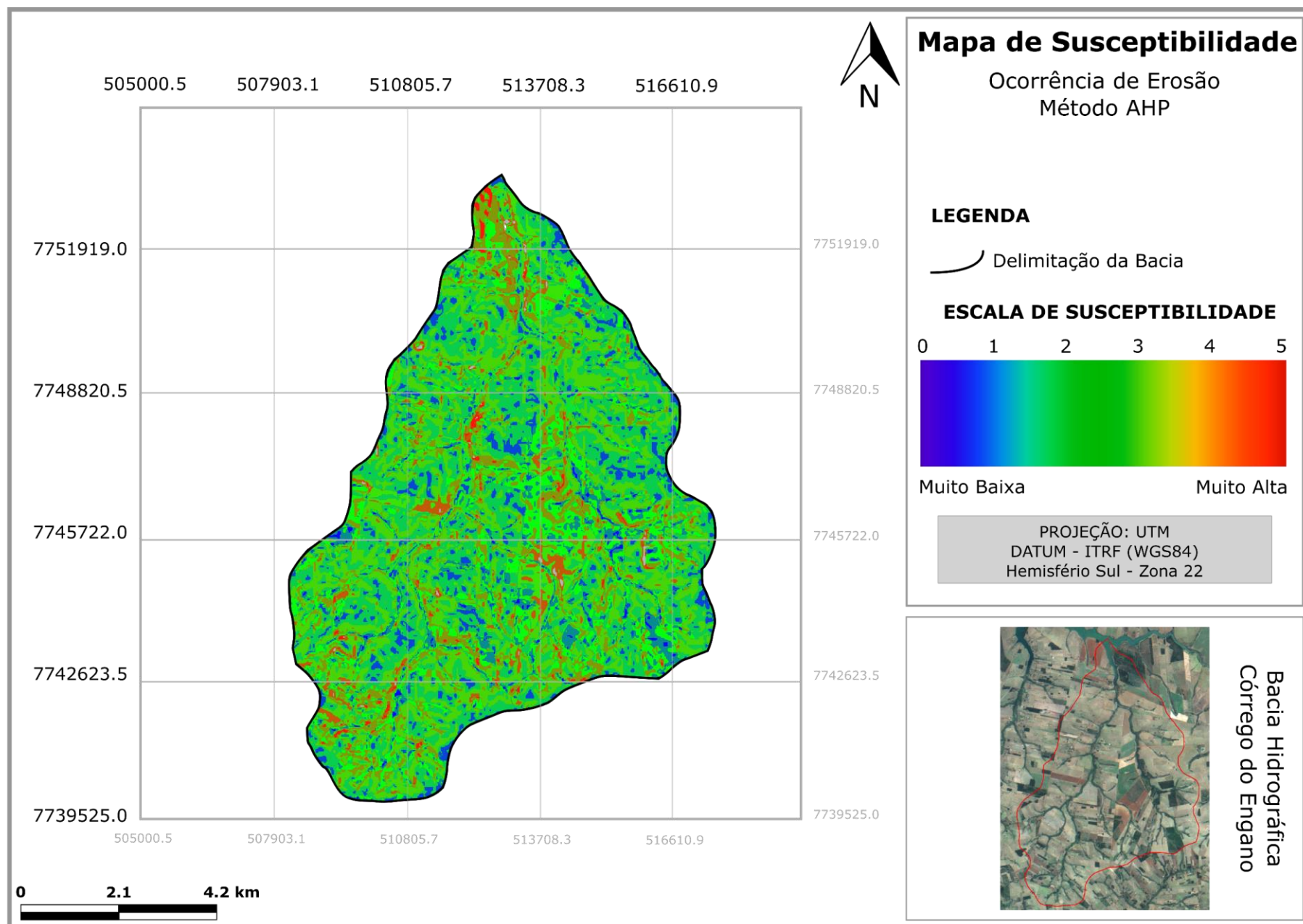
Grau de Susceptibilidade	Notas de Classe	Área (km²)	Porcentagem (%)
Muito baixa	<1	0.00	0.00
Baixa	2	9.28	12.77
Média	3	59.87	82.39
Alta	4	3.28	4.51
Muito alta	5	0.026	0.035
Totais		72.66	100

Fonte: Próprio autor.

A partir do mapa obtido é possível visualmente verificar os locais com alta problemática de ocorrência de processos erosivo. Conforme Tabela 39, a predominância foi da classe média em mais de 82% da área o que corresponde com as outras metodologias aplicadas. Os locais classificados entre o limiar alto da susceptibilidade média até muito alto estão presentes em locais onde há predominância de altas declividades, uma vez que esse fator é o de maior importância de acordo com a metodologia AHP adotada.

A predominância da área média na maior parte da bacia se deve principalmente ao fato de a maior parte das áreas estarem ocupadas por um solo moderadamente resistente à ocorrência de processos erosivos juntamente com as áreas de pastagem, que segundo a metodologia aplicada possui um menor potencial de aparecimento de processos erosivos.

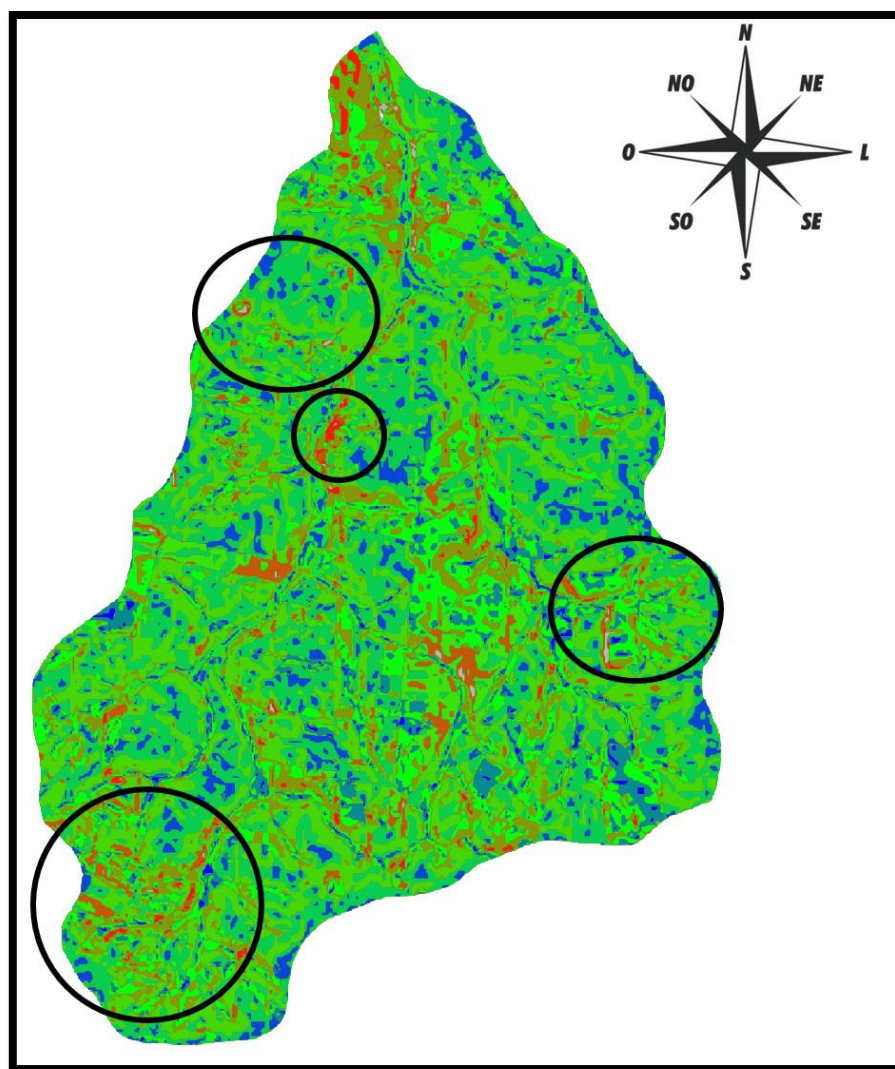
Figura 47 – Mapa de susceptibilidade erosiva conforme metodologia AHP



Fonte: Próprio autor.

Com relação a regiões específicas, como pode ser visto na Figura 48, o método AHP também demonstrou áreas com potenciais erosivos nas mesmas regiões obtidas através das duas formas de cálculos da USLE, contrário a metodologia de VNE. Há predominância de regiões de susceptibilidade alta na região sul, leste, noroeste e este foi o único método a encontrar algumas regiões próximo a exutória com fragilidade alta, provavelmente devido ao solo do tipo gleissolo próximo aos corpos hídricos.

Figura 48 – Regiões com alto potencial de ocorrência de processos erosivos



Fonte: Próprio autor.

4.4 Visita à campo para conhecimento da área

O trabalho de visita à campo foi feito no dia 10 de dezembro de 2018 e teve com intuito o conhecimento da área de estudo para saber na prática qual a situação em que se encontra a Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano quanto ao principal tipo de uso do solo e quais às práticas de conversação aplicadas na área. A visita foi feita em um único dia com a obtenção de diversas fotos que serão discutidas a seguir.

Como relatado anteriormente, as práticas agropecuárias presentes na área são predominantes a pecuária de corte com foque extensivo (Figura 49) e a cultura de cana-de-açúcar. Além disso, durante à visita percebeu-se que há também outras áreas com diferentes tipos de culturas, mas ocupando pequenas extensões de área e não fizeram parte da classificação por imagem de satélite, como: seringueiras, pomares de cítrus, plantações de banana, manga e uva (Figura 50).

Figura 49 – Pastagem de uso extensivo na Bacia do Córrego do Engano.
Localização: lat. 20 22 7.4575; long. 50 53 41.7544



Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Pomar na Bacia do Córrego do Engano. Localização: lat. 20 26 34.42525; long. 50 53 7.7105



Fonte: Próprio autor.

Outro detalhe importante notado durante a visita foi que a maioria das áreas destinadas a pastagem não possuíam qualquer tipo de proteção (curvas de nível, por exemplo – Figura 51) e quando estavam presentes eram nitidamente de baixa qualidade e que possivelmente não funcionaria corretamente como uma prática conservacionista do solo (Figura 52).

Figura 51 – Ausência de qualquer prática conservacionista. Localização: lat. 20 21 52.0628; long. 50 51 20.7998



Figura 52 – Precariedade das práticas conservacionistas. Localização: lat. 20 21 52.097 e long. 50 51 20.7861



Fonte: Próprio autor.

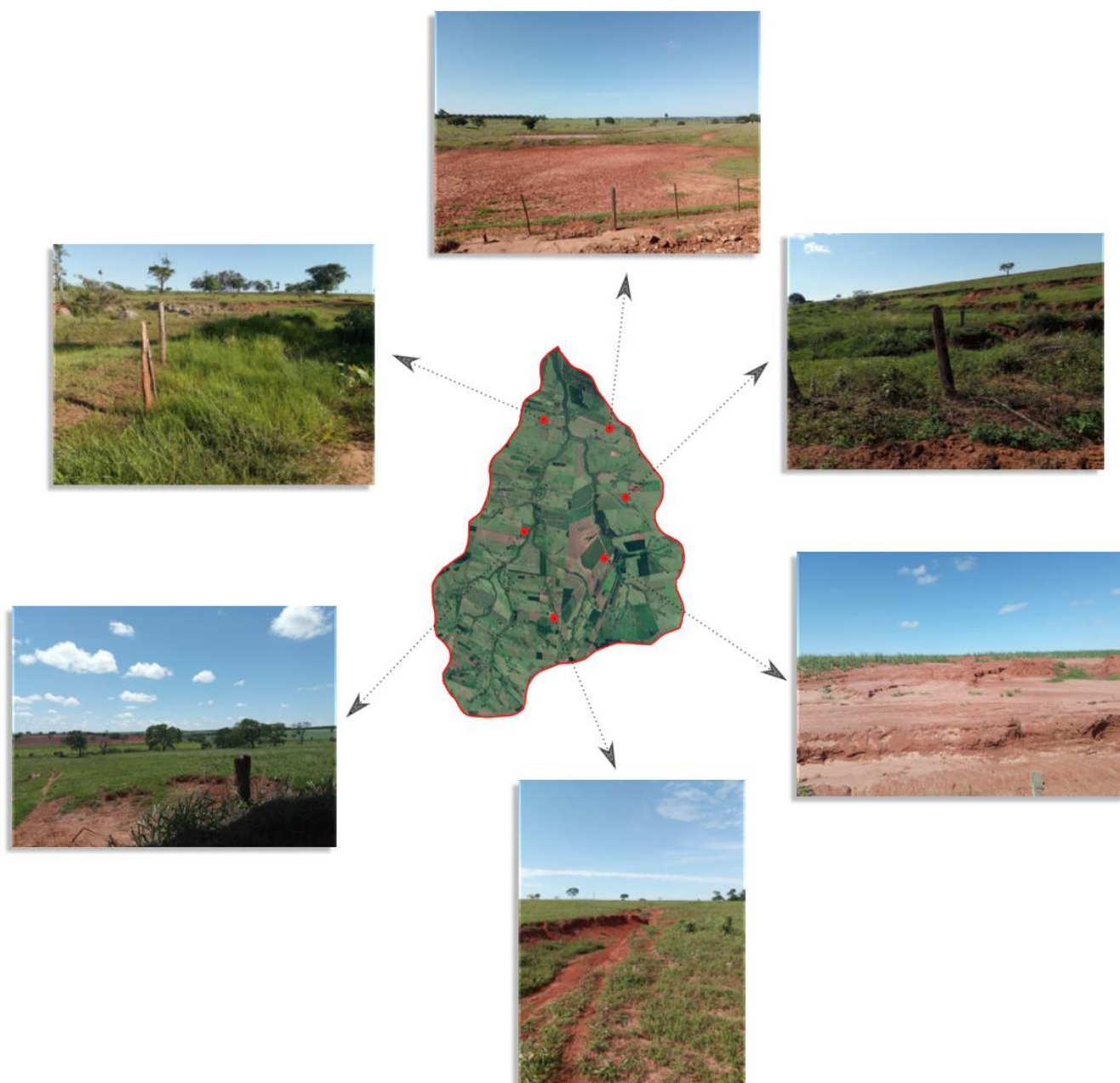
Outro detalhe importante que se percebeu durante à visita foi que a maior parte das regiões de várzea próximo a estradas não possuem qualquer proteção sendo os locais com os processos erosivos de maior extensão (Figura 53). Este tipo de erosão é pontual e poderia ser facilmente resolvido com obras hidráulicas no local. Com relação a outros processos erosivos, foram encontradas diversas formas em diversos locais em diferentes estágios (Figura 54) – desde erosão linear até voçorocas – indicando a problemática de processos erosivos em pequenas bacias e reforçando o resultado obtido através das metodologias aplicadas.

Figura 53 - Voçoroca próximo ao encontro entre um copo hídrico e estrada rural.
Localização: lat. 20 22 4.1752; long. 50 53 43.2925



Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Localização de diversas áreas degradadas por processos erosivos dentro da Bacia do Córrego do Engano



Fonte: Próprio autor.

Com essas imagens é possível entender a forma do relevo, declividades e tipo de uso da área em estudo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com o resultado obtido através da aplicação dos três diferentes métodos de avaliação quanto ao potencial erosivo dentro da Bacia Hidrográfica do Córrego do Engano, verificou-se a predominância de áreas entre potencial médio a médio-alto.

Nos três métodos, áreas com presença de vegetação nativas e várzeas influenciaram positivamente, reduzindo o potencial erosivo em algumas áreas da Bacia. Por outro lado, regiões com fatores topográficos acentuados – alta declividade e comprimento de rampa – juntamente com áreas de pastagem sem proteção foram os responsáveis pelas regiões com maior potencial erosivo e de perda de solo.

O método VNE foi o que forneceu o resultado mais homogêneo com uma generalização maior da área sem identificar aglomerados representando situações críticas quando ao potencial erosivo da área, conforme mapas apresentados.

As duas formas de cálculo adotadas para a metodologia da Equação do Universal de Perdas de Solos possibilitaram verificar as diferenças de resultados ao utilizar fontes de dados de outras origens para o mesmo fim. Ambos os mapas foram semelhantes ao mostrar tanto áreas menos frágeis quanto as áreas críticas. O mapa de estimativa de perda de solo gerado pela primeira forma de cálculo pode ser usado para aplicações de correções durante o manejo do solo em áreas maiores, devido aos seu menor detalhamento. Já o mapa gerado pela segunda forma de cálculo da USLE é recomendado para áreas menores devido a sua maior resolução, em função da fonte de dados utilizada, permitindo a aplicação de medidas protecionista a nível de propriedades rurais.

A metodologia AHP adotada forneceu resultados semelhantes ao encontrado na metodologia utilizando a USLE, devido à importância dado ao fator topográfico, onde também foi possível, por meio do mapa gerado, definir regiões com baixo a alto potencial de ocorrência de erosão.

Os métodos utilizando a USLE e AHP foram condizentes quando comparados aos mapas presentes no relatório de solos do SigRH onde são alocados alguns pontos e áreas com processos erosivos. Visualmente, ao comparar os mapas do estudo com os do relatório verifica-se que as regiões de alto potencial erosivo,

principalmente próximo aos cluster onde há uma concentração maior de áreas críticas, estão próximos aos pontos amostrados pelo relatório.

Em visita feita à área da Bacia Hidrográfica ficou evidente a ausência parcial de medidas preventivas ou protecionistas para áreas de pastagem e quando presentes foram feitas de forma irregular ou amadora onde sua eficiência está comprometida indicando que essas áreas se encontram em processo intenso de degradação, ressaltando a importância do adequado manejo do solo por proprietários rurais. Além disso, verificou-se que diversos pontos onde os corpos hídricos encontram estradas rurais as proteções de margem encontram-se em estado crítico, quando não ausentes, propiciando o aparecimento de erosões locais de grande extensão. Outro aspecto verificado foi a ausência de proteção próximo à margem dos córregos onde o rebanho bovino tinha acesso livre intensificando a destruição da mata ciliar que é conhecido por ser uma proteção contra erosão.

Dessa forma, os mapas gerados com os métodos utilizados juntamente com uma ação específica de campo podem servir como uma ferramenta de gestão e apoio para tomadores de decisão, assim como oferecer suporte a proprietários para a aplicação de medidas protecionistas locais ou regionais em áreas com alto potencial erosivos para evitar problemas futuros.

Por fim, a utilização de aplicação de técnicas de Geoprocessamento e softwares SIGs livres para a implementação dos diferentes modelos adotados ressaltou a já conhecida utilidade dessas ferramentas, onde é possível, de forma técnica, criar mapas de extrema confiabilidade para serem utilizados em projetos de planejamento ambiental. Além disso, seguindo as etapas do trabalho, é plausível a réplica das mesmas metodologias para outras áreas, caso haja a necessidade de estudo de planejamento ambiental quando ao potencial erosivo.

REFERÊNCIAS

AKGUN, A.; TURK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalik region, NW Turkey. **Computer & Geosciences**, [s. l.], v. 37, p. 1515–1524, 2011.

ALCARAZ, S. A.; SANNIER, C.; VITORINO, A. C. T.; DANIEL, O. Comparison of methodologies for automatic generation of limits and drainage networks for hydrographic basins. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 369-375. 2009.

ALMOROX, A. J., BERMUDEZ, F.L., RAFAELLI, S. **La degradacion de los suelos por erosion hídrica**: métodos de estimacion. Murcia: Universidade de Murcia, 2010. 384 p.

ALVES, M. C.; CARVALHO, M. P.; LIMA, R. C.; VANZELA, S. L. **Levantamento taxonômico semidetalhado dos solos da usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar**. Ilha Solteira: DEFERS/UNESP. 2009. v. 1.

ANDRADE, B. H.; BIAZI, M. S.; OLIVEIRA P. T. S.; RODRIGUES, B. B. R.; SOBRINHO, T. A. Caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica utilizando sistema de informações geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande, MS. **Anais [...]** Bento Gonçalves: ABRH, 2009. p. 9.

ANDRADES, F. C. O., SUERTEGARAY, D. M. A., GUASSELLI, L. A. Arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul: Investigação sobre a relação entre areais, drenagem e orientação do relevo. IV SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia: International Association of Geomorphology, 2006. p. 1 – 13.

ANDREOZZI, S. L. **Planejamento e Gestão de Bacias Hidrográficas**: uma abordagem pelos caminhos da sustentabilidade sistêmica. 2005. 151 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

ARAUJO, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área dos municípios de São Pedro/SP**. 2011. 177 f. Dissertação. Mestrado em Ciências Geotécnicas - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

ARONOFF, S. **Geographic information systems**: a management perspective. Ottawa: WDL Publications, 1989. 295 p.

BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F.; MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gratuitos. **Anuários do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 170-179, 2015.

BARBOSA, A. P.; ALESSANDRA F. S.; ZIMBACK, C. R. L. Modelo numérico do terreno obtido por diferentes métodos em cartas planialtimétricas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 655-660, 2012.

BARROW, C.J. **Land degradation**: development and breakdown of terrestrial environments. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

BENNET, H. H.; CHAPLINE, W. R. **Soil erosion**: a national menace. [S. l.]: U.S. Department of Agriculture, 1928. (Circular, 33)

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone Editora, 1999. 354 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone. p. 355, 2008.

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**, Amsterdam, v. 79, p. 49-59, 2009.

BOEHNER, J., SELIGE, T. Spatial Prediction of Soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In: BOEHNER, J.; MCCLOY, K. R.; STROBL, J. **SAGA**: analysis and modelling applications', goettinger geographische abhandlungen. [S. l.]: Goltze, 2006. p.13-27. v. 115.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. 1999. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1999. 340 p.

BOUYOUCOS, G. J. The Clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **American Society of Agronomy Journal**, Madison, v. 27, p. 738-741, 1935.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas**: manual operativo. Brasília, DF: Coordenação nacional do PNMH, 1987. p. 60.

BRASIL. Novo Código Florestal lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.

CAMARA G., SOUZA R. C. M., FREITAS U.M. "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling". **Computers & Graphics**, Kidlington, v. 20, p. 3, p. 395-403, 1996.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências da Computação) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

CARTWRIGHT, J. H. **Watershed erosion potential mapping using AHP modeling and GIS**. Starkville: Mississippi State University, 2018. Disponível em:

<https://coast.noaa.gov/data/docs/geotools/2017/presentations/Cartwright.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2018.

CARVALHO, E. M.; PINTO, S. A. F.; SEPE, P. M.; ROSSETTI, L. A. F. G. Utilização do geoprocessamento para avaliação de riscos de erosão do solo em uma bacia hidrográfica: Estudo de Caso da Bacia do Rio Passa Cinco/SP. III In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife - PE. **Anais [...]** Recife: UFPE, 2010. p. 1-8, 2010.

CHÁVEZ, C.; FUENTES, C.; BRAMBILA, F. Erosion control in furrow irrigation using polyacrylamide. **Soil Erosion Issues in Agriculture**, [s. l.], p. 279–295, 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS – CIIAGRO. **Monitoramento climatológico**. São Paulo, 2018. Disponível em: http://www.udop.com.br/download/estatistica/economia_chuvas/1996a2019_historico_mirandopolis.pdf. Acesso em: 10 jul. 2018.

CONOSCENT, C.; ANGILERI, S.; CAPPADONIA, C.; ROTIGLIANO, E.; AGNESI, V.; MARKER, M. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression. A casa of Sicily (Italy). **Geomorphology**, Amsterdam, v. 204, p. 399-411, 2014.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**, v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007.

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. 168 f. Dissertação (Mestrado Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico: econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação ambiental. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B. (org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DATAGEO. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2006. Disponível em: http://datageo.ambiente.sp.gov.br/datageofiles/Estudos/spaulo_lito_nota_explicativa.pdf. Acesso em: 25 jun. 2018.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; VAN DEURSEN, W. P. A. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I.

Theory, input and output. **Hydrological Processes**, Oxford, v. 10, p. 1107-1117, 1996.

DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. **Catena**, Amsterdam, v. 37, p. 477-493, 1999.

EASTMAN, J. R. Uncertainty and decision risk in multicriteria evaluation: implications for GIS software design. **Proceedings, International Institute for Software Technology Expert**, [s. l.], v. 21, p. 0-8, 1996.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows**: introdução e exercícios tutoriais. Tradução: Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Recursos IDRISI, 1998.

EASTMAN, J. R.; JIN, W.; PETER, A. K.; KYEM, TOLEDANO, J. Raster Procedure for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 61, p. 539-547, 1995.

EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows**: user's guide - version 2.0. Worcester: Clark University, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo [methods guide of soil analyses]**. Rio de Janeiro, 2011.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **USDA**: Water Erosion Prediction Project (WEPP) Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10, National Soil Erosion Research Lab. [S. l.]: USDA, 1995. 298 p.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CASTRO, N. E. A.; CARDOSO, D. P.; DIAS, A. C.; CARVALHO, G. J. Modelagem da proteção do solo por plantas de cobertura no sul de Minas Gerais. **Agroambiente**, Boa Vista, v. 6, p. 117-123, 2012.

FREITAS, P. L.; KERR, J. C. As pesquisas em microbacias hidrográficas: situação atual, entraves e perspectivas no Brasil. In: CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. (ed.) **Manejo integrados em microbacias hidrográficas**. Celso e Osmar (ed.), Londrina: IAPAR, 1996. p. 43-57.

FUJACO, M. A. G.; LEITE, M. G. P.; NEVES, A. H. C. J. A gis-based tool for estimating soil loss in agricultural river basins. **REM: Int. Eng. I.**, Ouro Preto, v. 69, p. 417-424, 2016.

FUREGATTI, S. A. **Avaliação da variabilidade das características geotécnicas relacionadas aos processos erosivos com ensaios in situ**. 2012. 467 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FUSHITA, A. T.; CAMARGO-BORTOLIN, L. H. G.; ARANTES, E. M.; MOREIRA, M. A. A.; CANÇADO, C. J.; LORANDI, R. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 63, p. 609-618, 2011.

GALLANT, J. C.; HUTCHINSON, M. F. Representation of Terrain: In: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographical information systems: introduction**. 2. ed. [S. l.]: Abridged, 2005. v. 1, Cap. 9, p. 404.

GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS – A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Beijing, v. 7, p. 953-961, 2016.

GASSMAN, P. W. REYES, M. R., GREEN, C. H., ARNOLD, J. G. The Soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, p. 1211-1250, 2007.

GODONE, D.; SATANCHI, S. **Soil erosion issues in agriculture**. INTECH open: Croatia, 2010. 346 p.

GOMES, D. M. **Mapeamento geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, São Pedro/SP na escala 1:20.000**. 2002. 242 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC – USP, São Carlos, 2002.

GRAÇA, C. H.; PASSIG, F. H.; KELNIAR, A. R.; PIZA, M. A.; CARVALHO, K. Q.; ARANTES, E. J. Multitemporal analysis of estimated soil loss for the river Mourão watershed, Paraná – Brazil. **Braz. J. Biol.**, Sao Carlos, v. 75, n. 4, p. 120-130, 2015.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V. **Introdução ao geoprocessamento: princípios básicos e aplicação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. v. 67, 52 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Site*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/nova-canaa-paulista/panorama>. Acesso em: 17 de abril de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil: variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA - INCRA.
Classificação dos Imóveis Rurais. [S. l.], 2018. Disponível em:
<http://www.incra.gov.br/tamanho-propriedades-rurais>. Acessado em 23 de abril de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Catálogo de imagens.
 Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em 17 Dez. 2017. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 1967a. Carta Topográfica. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/cartas>. Acessado em: 25 jan. 2018

JAXA. **Dataset:** PRISM, JAXA 2008. Retrieved from ASF 21 Setembro 2018.

JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation.** Cambridge: Cambridge University, 1994. 296 p.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (ed.) **Handbuch der klimatologie.** Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. Banda 1, Parte C, p. 1-44.

LAL, R. **Soil Erosion in the tropics:** principles and management. New York: McGraw Hill. p. 580, 1990.

LIMA, C. G. R., CARVALHO, M. P., SOUZA, A., COSTA, N. R., MONTANARI, R. Influência de Atributos Químicos na Erodibilidade e Tolerância de Perda de Solo na Bacia Hidrográfica do Baixo São José dos Dourados. **Geociências**, v. 35, n. 1, p. 63 – 76, 2016.

LIMA, W. P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas.** Piracicaba: ESALQ/USP. 1976.

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

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. Geographical information systems: introduction. **Abridged**, Bethesda, v. 1, p. 404, 2005.

LU, D.; LI, G.; VALLADARES, G. S.; BATISTELLA, M. Mapping soil erosion risk in Rodonia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 15, p. 499-512, 2004.

MAFRA, N. M. C. Erosão e planificação de uso do solo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340 p.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda de solos dos Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 05, p. 1335-1340, 2002.

MARTINI, L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. Avaliação da susceptibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 6, p. 41-52, 2006.

MEDEIROS, G. O. R.; GIAROLLA, A.; SAMPAIO, G.; MARINHO, M. A. Estimates of annual soil loss rates in the State of Sao Paulo, Brazil. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, MG, v. 40, 2016.

MICHETTE, J. F. **Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (BROA), SP**. 2015. 275 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MIDDLETON, H. E. Properties of soils, which influence soil erosion, U.S.D.A. **Techn. Bull**, Whashington, n. 178, p. 1-16, 1930.

MOREIRA, M. C.; CECÍLIO, R. A.; PINTO, F. A. C.; LOMBARDI NETAL, F.; PRUSKI, F. F. P. Programa Computacional para Estimativa da Erosividade da Chuva no Estado de São Paulo Utilizando Redes Neurais Artificiais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 14, p. 88 – 92, 2006.

MOHAMADI, M. A., KAVIAN, A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 3, p. 273-281, 2015.

MOREIRA, M. C.; CECÍLIO, R. A.; PINTO, F. A. C.; PRUSKI, F. F. P. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. **Revist. Bras. Cien. Solo**, Viçosa, MG, v. 30, p. 1069-1076, 2006.

MORINAGA, M., S.; RUEDA, J. R. J. Análise morfoestrutural aplicada para avaliação de suscetibilidade à degradação ambiental por erosões hídricas lineares no interior do Estado de São Paulo. **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 15, p. 45-56, 2015.

NEVES, M. P., **Análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego do Meio – Município de São Pedro – SP: estudo do desencadeamento das erosões**. 2017. 179 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

NISHYAMA, L. **Erosão do solo**: seminários gerais em geotecnia. São Carlos: USP/E.E.S.C, 1995.

NOORI, H.; SIADATMOUSAVI, S. M.; MOJARADI, B. Assessment of sediment yield using RS and GIS at two sub-basins of Dez Watershed, Iran. **International Soil and Water Conversation Research**, Beijing, v. 4, p. 199-206, 2016.

NOORI, H., KARAMI, H., FARZIN, S., SIADATMOUSAVI, S. M., MOJARADI, B., KISI, O. Investigation of RS and GIS techniques on MPSIAC model to estimate soil erosion. **Nat Hazards**, [s. n.], v. 91, p. 221 -238, 2018.

OHATA, A. T. **Projeto DataGEO: avanços e desdobramentos**. São Paulo: Implantação de um Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (IDEA-SP); Departamento de Informações Ambientais (DIA); Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA); Secretaria do Meio Ambiente (SMA), 2015.

OLIVEIRA, A. M. M.; DE PINTO, S. A. F.; LOMBARDI NETO, F. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de Geotecnologias e modelo preditivo. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v. 5, p. 63–86, 2007.

PAULA, A. S.; CAINZOS, L. P.; BARROS, O. N. F.; RALISCH, R. Análise multitemporal do uso e ocupação do solo entre 1987 e 2004 na zona de expansão urbana norte de Londrina – PR, utilizando Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 2877-2890, 2012.

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico Geológico-Geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos – SP, com auxílio de geoprocessamento**. 2006. 233 f. Dissertação (Mestrado em?) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: HANDBOOK n. 703. Washington: US Department of Agriculture, 1997. p. 404.

RENARD, K. G.; YODER, D. C.; LIGHTLE, D. T.; DABNEY, S. M. Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In: MORGAN, R. P. C.; NEARING, M. A. **Handbook of Erosion Modelling**. [S. l.]: Blackwell Publishing, 2011. Cap. 8, p. 413.

RENSCHLER, C. S. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. **Hydrological Process**, Oxford, v. 17, p. 1005-1017, 2003.

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 628-636, 2007.

ROBERTSON, G. P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 10, p. 41-58, nov. 1996.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Depto. Geografia** – FFLCH-USP, São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. **Instituto Florestal**, São Paulo, v.1, p. 118, 2017.

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. Avaliação dos processos erosivos através da Equação Universal de Perda de Solos, implementada com algoritmos em LEGAL. **Geomática**, Ontario, p. 1-9, 2006.

RUTHES, J. M.; TOMAZONI, J. C.; GOMES, T. C. Uso de sistema de informações geográficas na determinação do fator topográficos da Bacia do Rio Catorze, Sudoeste do PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 25, n. 5, p. 1099-1109, 2012.

SAIS, A. C.; BELI, E. Obtenção de parâmetros morfométricos de bacia hidrográfica por meio de um sistema de informações geográfica. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p. 110 – 118, 2012.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e Prevenção de Processos Erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1999. p. 340,

SAMPAIO, L. F. **Estudo geológico-geotécnico dos processos erosivos e proposta de macrodrenagem: Voçoroca do Córrego do Cravo (Nazareno – MG)**. 2014. 223 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SCOTTO, L. N. **Avaliação de vulnerabilidade à perda de solo da bacia hidrográfica do Rio Icamaguã – RS**. 2012. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SENA, J. N. **O uso de Sistema de Informações Geográfica na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de susceptibilidade à erosão**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

SISTEMA NACIONAL DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL - SiCar. **Total de imóveis**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.car.gov.br/publico/municipios/downloads?sigla=SP>. Acesso em: 23 abr. 2018.

SISTEMAS DE INFORMAÇÕES DO ESTADO DE SÃO PAULO – SIFESP. Mapa florestal dos municípios do Estado de São Paulo: Nova Canãa Paulista – 1:90000. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/sifesp/mapas-municipais/>. Acesso em: 10 abr. 2018.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO - SigRH. **Elaboração de mapa de feições erosivas urbanas e rurais da Bacia Do Rio São José dos Dourados**. São Paulo, 2008. 84 p. (Relatório Técnico, n. 295/07). Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7069/2008_erosao_sjd.pdf. Acesso em: 24 abr. 2018.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 140 p.

SILVA, W. G.; MACHADO, V. M.; CHAGAS, M. V. S.; FLORES, W. M. F. Susceptibilidade a erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informações geográfica. **Cerrado Agrociências**, [s. l.], v. 7, p. 66-78, 2016.

STEIN, D. P. **Avaliação da degradação do meio físico da bacia do Rio Santo Anastácio, Oeste Paulista**. 1999. Tese (Dourado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de Bacia Hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, Araraquara, v. 20, p. 136-155, 2007.

THOMPSON, D., FIDALGO, E. C. C. Estimativa da Perda de Solos Por Meio Da Equação Universal de Perdas de Solos (Usle) com Uso do Invest Para A Bacia Hidrográfica do Rio Guapi-Macacu – RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2013. p. 1-7.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 3, p. 235-244, 2005.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões – MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977.

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY: GIS DATA LAYERS VISUALIZATION - USGS. **GIS data layers visualization**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/gis-data-layers-visualization>. 2016. Acesso em: 03 maio 2018.

VALERIANO, M. 2004. 72 f. Dissertação (Mestrado em Geoprocessamento de Dados) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José do Campos, 2004

VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de susceptibilidade à erosão em área rural. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, 2012.

VANDAELE, K, POESEN J., GOVERS, G., WESEMAEL B. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p. 161-173, 1996.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão das Chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 405-412, 1995.

VILAR, O. M.; PRANDI, E.C. Erosão dos solos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Solos do interior de São Paulo**. São Carlos: ABMS; EESC-USP, 1993. Cap. 7, p.177–206.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

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

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**: a guide for selecting practices for soil and water conservation. Whashington: USDA Agricultural Handbook, 1965. n. 282.

WU, Q.; WANG, M. A framework for risk assessment on soil erosion by water using an integrated and systematic approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 337, p. 11-21, 2007.

ZACHAR, D. **Soil erosion**. New York: Elsevier, 1982. 548 p.

ZAPAROLI, F. C. M.; CREMON, E. H. Análise comparativa entre quatro metodologias de fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jagada, Noroeste Paulista. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 12., 2010, São Paulo, SP. **Anais [...]** São Paulo: USP, 2010. p. 1 – 18..

APÊNDICE

Link para download de todos os algoritmos LEGAL:

https://drive.google.com/drive/folders/1HbuiTQ6PP3WJEh2__5kzpCGN2cigYe0V?usp=sharing

1 – Algoritmo LEGAL para obtenção do tema Geomorfologia

```
{
  Tematico decli ("Declividade"), ampalt ("Geomorfologia"), ampinter
  ("Geomorfologia");
  Tabela Declivpond (Ponderacao), AmpAltpond (Ponderacao), AmplInterpond
  (Ponderacao);
  Numerico declivp ("Declividade_pond"), ampaltp ("Amplit_Alti_pond"), ampinterp
  ("Amplit_Inter_pond"), geomorfp ("Geomor_Result");
  //=====
  Declivpond = Novo (Categorialni = "Declividade", "1. 0 - 2" : 1, "2. 2 - 5" : 1.5, "3. 5 -
  10" : 2.0, "4. 10 - 15" : 2.0, "5. 15 - 20" : 2.0, "6. 20 - 25" : 2.5);
  AmpAltpond = Novo (Categorialni = "Geomorfologia", "1. 0 - 20 m" : 1.0, "2. 20 - 40
  m" : 1.3, "3. 40 - 80 m" : 1.7, "4. 80 - 120 m" : 2.0, "5. 120 - 160 m" : 2.3);
  AmplInterpond = Novo (Categorialni = "Geomorfologia", "500 - 750 m" : 2.8, "750 -
  1000 m" : 2.7, "1000 - 1250 m" : 2.6, "1250 - 1500 m" : 2.5);
  //=====
  decli = Recuperar (Nome = "Declividade_rec");
  ampalt = Recuperar (Nome = "Amplitude_Altimétrica_rec");
  ampinter = Recuperar (Nome = "Amplitude_Interfluvial");
  //=====
  declivp = Novo (Nome = "Declividade", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min
  = 1, Max = 3);
  ampaltp = Novo (Nome = "Amplit_Alti", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min
  = 1, Max = 3);
  ampinterp = Novo (Nome = "Amplit_Inter", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000,
  Min = 1, Max = 3);
  declivp = Pondere (decli, Declivpond);
  ampaltp = Pondere (ampalt, AmpAltpond);
  ampinterp = Pondere (ampinter, AmplInterpond);
  //=====
  //geomorfp = Novo (Nome = "GeomorfGrade"), ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000, Min = 1, Max = 3);
  geomorfp = Novo (Nome = "Geomorf_Gra", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000);
  geomorfp = (declivp + ampaltp + ampinterp)/3;
}
```

Algoritmo LEGAL para obtenção da ponderação dos 5 temas e criação da grade de vulnerabilidade para posterior fatiamento das classes

```
{
Tematico solos ("Relatório_Solos"), lito ("Relatório_Solos"), preci
("Relatório_Solos"), uso ("Classificada");
Tabela solospond (Ponderacao), litopond (Ponderacao), precipond (Ponderacao),
usopond (Ponderacao);
Numerico solosp ("Classes_Ponderadas"), litop ("Classes_Ponderadas"), precip
("Classes_Ponderadas"), usop ("Classes_Ponderadas"), geomorfp
("Geomor_Result"), vulner ("Classes_Ponderadas");
//=====
solospond = Novo (CategorialNi = "Relatório_Solos", "PVA1 - Argissolos Vermelho-
Amarelos" : 2.0, "PV4 - Argissolos Vermelhos" : 2.1, "GX5 - Gleissolo Haplico e
Neossolo Fluvico" : 3.0);
litopond = Novo (CategorialNi = "Relatório_Solos", "1 - Dacito" : 1.1, "2 - Arenito" :
2.4, "3 - Arenito e Argelito Arenoso" : 2.55);
precipond = Novo (CategorialNi = "Relatório_Solos", "Precipitação Média - 102.16
mm/mês" : 1.3);
usopond = Novo (CategorialNi = "Classificada", "1. Veget. Rasteira" : 2.8, "2. Corpos
de Agua" : 1.5, "3. Solos Expostos" : 3.0, "4. Reservas" : 1.0, "5. Culturas" : 2.9, "6.
Urbano" : 1.0);
//=====
solos = Recuperar (Nome = "SolosSP2017_1");
lito = Recuperar (Nome = "Litologia_rec");
preci = Recuperar (Nome = "Precipitação");
uso = Recuperar (Nome = "Class_rec");
//=====
solosp = Novo (Nome = "Solos_pond", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min
= 0, Max = 4);
litop = Novo (Nome = "Litologia_pond", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min
= 0, Max = 4);
precip = Novo (Nome = "Precipitação_pond", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
10000, Min = 0, Max = 4);
usop = Novo (Nome = "Uso_pond", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min = 0,
Max = 4);
solosp = Pondere (solos, solospond);
litop = Pondere (lito, litopond);
precip = Pondere (preci, precipond);
usop = Pondere (uso, usopond);
geomorfp = Recuperar (Nome = "Geomorf_Gra");
//=====
vulner = Novo (Nome = "Mapa_de_Estabilidade", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
10000);
vulner = (solosp + litop + precip + usop + geomorfp)/5;
}
```

3 – Algoritmo LEGAL para obtenção dos mapas de perda de solo através da USLE

```

USLE_simples_C_K_R
{
  Tematico usoocup ("Classificada"), erodib ("Relatório_Solos"), erosiv
  ("Relatório_Solos");
  Tabela Cpond (Ponderacao), Kpond (Ponderacao), Rpond (Ponderacao);
  Numerico Cpond2 ("MNT"), Kpond2 ("MNT"), Rpond2 ("MNT");
  //-----
  Cpond = Novo (Categorialni = "Classificada", "1. Veget. Rasteira" : 0.042, "2.
  Corpos de Agua" : 0.0, "3. Solos Expostos" : 1.0, "4. Reservas" : 0.012, "5.
  Culturas" : 0.05, "6. Urbano" : 0.0);
  Kpond = Novo (Categorialni = "Relatório_Solos", "GX5 - Gleissolo Haplico e
  Neossolo Fluvico" : 0.0044, "PVA1 - Argissolos Vermelho-Amarelos" : 0.0466,
  "PV4 - Argissolos Vermelhos" : 0.0228);
  Rpond = Novo (Categorialni = "Relatório_Solos", "Precipitacao Media" : 6556);
  //-----
  usoocup = Recupere (Nome = "Class_rec");
  erodib = Recupere (Nome = "SolosSP2017_1");
  erosiv = Recupere (Nome = "Precipitação");
  //-----
  Cpond2 = Novo (Nome = "GRD_C_MetodoSimples", ResX = 10, ResY = 10,
  Escala = 10000, Min = 0, Max = 1.0);
  Kpond2 = Novo (Nome = "GRD_K_MetodoSimples", ResX = 10, ResY = 10,
  Escala = 10000, Min = 0, Max = 1.0);
  Rpond2 = Novo (Nome = "GRD_R_MetodoSimples", ResX = 10, ResY = 10,
  Escala = 10000, Min = 0, Max = 100);
  Cpond2 = Pondere (usoocup, Cpond);
  Kpond2 = Pondere (erodib, Kpond);
  Rpond2 = Pondere (erosiv, Rpond);
}

USLE_simples_LS
{
  Numerico Dec ("GRD_Declividade"), CompRamp ("LS-USLE-MNT"), LS ("MNT");
  //
  Dec = Recupere (Nome = "Declividade_topodata_1");
  CompRamp = Recupere (Nome = "CompRampaNovo_rec");
  //Novo Pi
  LS = Novo (Nome = "GRD_LS_MetodoSimples", ResX=10, ResY=10,
  Escala=10000, Min=0, Max=1000);
  //Calculo
  LS = 0.00984*((CompRamp)^0.63)*(Dec^1.18);
}

```

USLE_final_metodosimples

```
{
Numerico erosi ("MNT"), erodi ("MNT"), LS ("MNT"), CP ("MNT"), USLE ("MNT");
//-----
LS = Recuperar (Nome = "GRD_LS_MetodoSimples");
CP = Recuperar (Nome = "GRD_C_MetodoSimples");
erosi = Recuperar (Nome = "GRD_K_MetodoSimples");
erodi = Recuperar (Nome = "GRD_R_MetodoSimples");
//-----
USLE = Novo (Nome = "Mapa_USLE2_metodosimples", ResX = 10, ResY = 10,
Escala = 10000);
USLE = (erosi * erodi * LS * CP);
}
```

USLE_fatores_CP

```
{
Tematico uso2 ("Classificada");
Tabela usopondCP (Ponderacao);
Numerico usop2 ("MNT");
//-----
usopondCP = Novo (Categorialni = "Classificada", "1. Veget. Rasteira" : 0.04, "2.
Corpos de Agua" : 0.0, "3. Solos Expostos" : 0.5, "4. Reservas" : 0.007, "5.
Culturas" : 0.2, "6. Urbano" : 0.0);
//-----
uso2 = Recuperar (Nome = "Class_rec");
//-----
usop2 = Novo (Nome = "GRD_CP", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000, Min
= 0, Max = 1.0);
usop2 = Pondere (uso2, usopondCP);
}
```

USLE_final

```
{
Numerico erosi ("MNT"), erodi ("Amostras_GS+"), LS ("MNT"), CP ("MNT"), USLE
("MNT");
//-----
LS = Recuperar (Nome = "GRD_LS_rec");
CP = Recuperar (Nome = "GRD_CP");
erosi = Recuperar (Nome = "GRD_Erosi_rec");
erodi = Recuperar (Nome = "GRD_K_horA_Krig");
//-----
USLE = Novo (Nome = "Mapa_USLE1", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000);
USLE = ((erosi/100) * erodi * LS * CP);
}
```

3 - AHP_Pond

```

{
  Tematico usoocup ("Classificada"), solo ("Relatório_Solos"), chuva
  ("Relatório_Solos"), decli ("Declividade_1");
  Tabela Upond (Ponderacao), Spond (Ponderacao), Ppond (Ponderacao), Dpond
  (Ponderacao);
  Numerico Upond2 ("MNT"), Spond2 ("MNT"), Ppond2 ("MNT"), Dpond2 ("MNT");
  //-----
  Upond = Novo (Categorialni = "Classificada", "1. Veget. Rasteira" : 2, "2. Corpos
  de Agua" : 1, "3. Solos Expostos" : 4, "4. Reservas" : 1, "5. Culturas" : 3, "6.
  Urbano" : 1);
  Spond = Novo (Categorialni = "Relatório_Solos", "GX5 - Gleissolo Haplico e
  Neossolo Fluvico" : 5, "PVA1 - Argissolos Vermelho-Amarelos" : 2, "PV4 -
  Argissolos Vermelhos" : 4);
  Ppond = Novo (Categorialni = "Relatório_Solos", "Precipitacao Media" : 3);
  Dpond = Novo (Categorialni = "Declividade_1", "1. 0 a 2 - Plano" : 1, "2. 2 a 5 -
  Suave Ondulado" : 2, "3. 5 a 10 - Moderadamente Ondulado" : 3, "4. 10 a 15 -
  Ondulado" : 4, "5. 15 a 45 - Forte Ondulado" : 5);
  //-----
  usoocup = Recupere (Nome = "Class_rec");
  solo = Recupere (Nome = "SolosSP2017_1");
  chuva = Recupere (Nome = "Precipitação");
  decli = Recupere (Nome = "Mapa_Declividades_1");
  //-----
  Upond2 = Novo (Nome = "GRD_uso_AHP", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000, Min = 0, Max = 1.0);
  Spond2 = Novo (Nome = "GRD_solos_AHP", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000, Min = 0, Max = 1.0);
  Ppond2 = Novo (Nome = "GRD_chuva_AHP", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000, Min = 0, Max = 100);
  Dpond2 = Novo (Nome = "GRD_decli_AHP", ResX = 10, ResY = 10, Escala =
  10000, Min = 0, Max = 100);
  Upond2 = Pondere (usoocup, Upond);
  Spond2 = Pondere (solo, Spond);
  Ppond2 = Pondere (chuva, Ppond);
  Dpond2 = Pondere (decli, Dpond);
}

```

AHP Mapa Final

```

{
  Numerico chuva ("MNT"), solo ("MNT"), uso ("MNT"), decliv ("MNT"), AHP
  ("MNT");
  //-----
  chuva = Recupere (Nome = "GRD_chuva_AHP");
  solo = Recupere (Nome = "GRD_solos_AHP");
  uso = Recupere (Nome = "GRD_uso_AHP");
}

```

```
decliv = Recuperare (Nome = "GRD_decli_AHP");  
//-----  
AHP = Novo (Nome = "Mapa_AHP", ResX = 10, ResY = 10, Escala = 10000);  
AHP = 0.055*chuva + 0.1178*solo + 0.2634*uso + 0.5638*decliv;  
}
```

4 – BANCO DE DADOS

