

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

MARIANA BARBOSA DE CARVALHO

**Comparação de abordagens metodológicas para avaliação do potencial de
ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú,
Aparecida D'Oeste – SP**

Ilha Solteira
2019



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIANA BARBOSA DE CARVALHO

Comparação de abordagens metodológicas para avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú, Aparecida D'Oeste – SP

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

Prof. Dr. José Augusto de Lollo
Orientador

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331c Carvalho, Mariana Barbosa de.
Comparação de abordagens metodológicas para avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos na bacia hidrográfica do córrego do Jaú, Aparecida D'Oeste – SP / Mariana Barbosa de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
113 f. : il.

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

Orientador: José Augusto de Lollo
Inclui bibliografia

1. Erosão. 2. USLE. 3. Vulnerabilidade. 4. SIG.


João Paulo Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

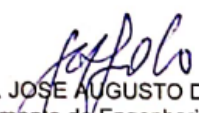
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Comparação de abordagens metodológicas para avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos na Baía Hidrográfica do Córrego do Jaú, Aparecida D'Oeste-SP

AUTORA: MARIANA BARBOSA DE CARVALHO

ORIENTADOR: JOSE AUGUSTO DE LOLLO

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


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


Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
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

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Augusto de Lollo, por todos os ensinamentos transmitidos, por me guiar no mundo da pesquisa científica desde a graduação e pela paciência ao longo dos anos.

Agradeço também ao Prof. Dr. Cesar Gustavo da Rocha Lima por suas contribuições fundamentais para a realização desse trabalho e por sempre cobrar o melhor, incentivando ainda mais minha dedicação.

Ao Nelson, por me auxiliar e contribuir em todas as fases de elaboração desse trabalho, e por estar ao meu lado sempre, dividindo todas as preocupações e alegrias ao longo desta jornada.

Aos meus pais, pelo amor e carinho, pelos exemplos, e por seus esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

A erosão, especialmente do tipo acelerada, é um fenômeno com grande potencial de causar degradação ambiental, diminuindo a produção de alimentos, provocando a desertificação de áreas, o assoreamento de rios, o deslizamento de solo, entre outros. Dessa forma, o estudo dos processos erosivos e suas consequências é de fundamental importância em diversas áreas do conhecimento, exatamente para que possam ser propostas formas de remediar os casos já existentes e prevenir possíveis próximas ocorrências. Dentre os tipos de erosão existentes destaca-se a hídrica, e os parâmetros envolvidos nesse cenário podem ser diversos, envolvendo tanto fatores naturais, como as propriedades do solo, o clima e o relevo, quanto antropogênicos, como a ocupação do solo e técnicas de manejo. Além disso, uma ferramenta muito utilizada nos estudos de suscetibilidade à erosão é o SIG, ou Sistemas de Informações Geográficas, devido à sua capacidade de armazenar, manipular, analisar e apresentar dados distribuídos espacialmente e georreferenciados. O uso dessa ferramenta proporciona tanto a melhora na precisão dos valores obtidos, quanto diminui o tempo consumido durante os cálculos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os resultados de diferentes abordagens de avaliação do potencial de ocorrência de erosão na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú, em Aparecida D'Oeste – SP, envolvendo diversos parâmetros naturais e antrópicos, e utilizando sistemas de informações geográficas, de forma a verificar a aplicabilidade desses métodos na bacia de estudo. Para o estudo proposto foram aplicados os métodos da Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE) e adaptações da Equação Universal da Perda de Solo (USLE), além da comparação dos resultados com registros de processos erosivos na área de estudo. Em todos os casos analisados o fator uso e cobertura do solo foi de grande importância para o resultado final, assim como o fator topográfico. Verificou-se ainda que o método do VNE gerou os mapas mais abrangentes e os menores valores de susceptibilidade à erosão, enquanto os mapas da USLE com o fator LS simplificado e o uso do fator práticas conservacionistas foi considerado como a representação mais fiel da área de estudo.

Palavras-chave: Erosão. USLE. Vulnerabilidade. SIG.

ABSTRACT

Erosion, especially the accelerated type, is a phenomenon with high potential to cause environmental degradation, declining food production, causing desertification of areas, siltation of rivers, landslides, among others. Thus, the study of erosion and its consequences is of fundamental importance in many areas of knowledge, so that ways to remedy existing cases of it and prevent possible subsequent occurrences can be proposed. Among the existing types of erosion, the one caused by water stands out, and the parameters involved in this scenario may be diverse, involving both natural factors, such as soil properties, climate and relief, and anthropogenic ones, such as soil occupation and management. In addition, a tool widely used in erosion susceptibility studies is GIS, due to its ability to store, manipulate, analyze and present spatially distributed and geo-referenced data. The use of this tool provides both the improvement in the accuracy of the values obtained and the reduction of time consumed during calculations. So, the objective of this study was to evaluate the results of different approaches to assess the potential for erosion occurrence in the Córrego do Jaú watershed, in Aparecida D'Oeste – SP, involving several natural and anthropic parameters, and using geographic information systems, in order to verify the applicability of these methods in the study basin. For the proposed study, the methods of the Natural Vulnerability to Erosion (VNE) and adaptations of the Universal Soil Loss Equation (USLE) were applied, in addition to comparing the results with records of erosion processes in the region of study. In all cases analyzed, the use and land cover factor was of great importance for the final result, as well as the topographic factor. It was also verified that the VNE method generated the most comprehensive maps and the lowest values of susceptibility to erosion, whereas the USLE maps with the simplified LS factor and the use of the conservationist practices factor was considered as the most faithful representation of the studied area.

Keywords: Erosion. USLE. Vulnerability. GIS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do processo de erosão	18
Figura 2 - Perfis de encosta e a relação com o ângulo de escoamento	27
Figura 3 - Perfis de encosta convexo com curvas de nível côncavas (A), convexo com curvas de nível convexas (B), côncavo com curvas de nível côncavas (C), e côncavos com curvas de nível convexas (D).....	27
Figura 4 - Delimitação da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	49
Figura 5 - Climograma do município de Aparecida D'Oeste – SP	50
Figura 6 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú.....	51
Figura 7 - Mapa litológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	52
Figura 8 - Organograma do estudo do potencial de ocorrência de processos erosivos na bacia hidrográfica de estudo	54
Figura 9 - Mapa de amplitude interfluvial para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	59
Figura 10 - Mapa de amplitude altimétrica para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	61
Figura 11 - Mapa de declividade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	62
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	65
Figura 13 - Mapa de erosividade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	70
Figura 14 - Mapa de erodibilidade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	72
Figura 15 - Registros de erosões na região de estudo de acordo com o Mapa de Feições Erosivas Urbanas e Rurais da Bacia do Rio São José dos Dourados	76
Figura 16 - Processos erosivos identificados através de análise de imagens de satélite do Google Earth Pro (GOOGLE, 2018).....	77
Figura 17 - Mapa utilizados no método da Vulnerabilidade Natural à Erosão..	79
Figura 18 - Mapa de Vulnerabilidade Natural à Erosão para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	80
Figura 19 - Mapa de Vulnerabilidade Natural à Erosão dividido em classes ...	81
Figura 20 - Mapa classificado da Vulnerabilidade Natural à Erosão com a localização dos processos erosivos identificados na bacia	83
Figura 21 - Perda de solo para a Bacia do Córrego do Jaú com Fator LS simplificado, sem o Fator P (A) e com o Fator P (B).....	90
Figura 22 - Perda de solo para a Bacia do Córrego do Jaú com Fator LS obtido pelo SAGA, sem o Fator P (A) e com o Fator P (B).....	91
Figura 23 - Distribuição do Fator LS para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú a partir do método simplificado (Fig. A) e do software SAGA (Fig. B)	93

Figura 24 - Mapa classificado de perda de solo estimada com a distribuição espacial dos processos erosivos identificados na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú para a utilização do Fator LS simplificado e considerando o Fator P...	96
Figura 25 - Exemplos de pontos inspecionados durante a visita a campo que possuíam processos erosivos em diferentes níveis	98
Figura 26 – Propriedade com prática conservacionista de plantio em nível	99
Figura 27 - Margem do córrego sem proteção sendo utilizada para animais beberem água.....	99
Figura 28 - Leito do Córrego do Jaú coberto por vegetação de áreas úmidas	100
Figura 29 - Leito principal do Córrego do Jaú	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos principais métodos para obtenção dos parâmetros utilizados na RUSLE	32
Tabela 2 - Escala de Vulnerabilidade das Unidades Territoriais Básicas	55
Tabela 3 – Escala de vulnerabilidade para diferentes tipos de rochas	56
Tabela 4 - Escala de vulnerabilidade para os tipos de rochas existentes na área de estudo	57
Tabela 5 - Escala de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial	58
Tabela 6 - Escala de vulnerabilidade para diferentes valores de amplitude altimétrica	60
Tabela 7 - Escala de vulnerabilidade para diferentes valores de declividade ..	62
Tabela 8 - Escala de vulnerabilidade para diferentes tipos de solo	63
Tabela 9 - Escala de vulnerabilidade para os tipos de solo existentes na área de estudo	64
Tabela 10 - Escala de vulnerabilidade e área ocupada por cada classe de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	66
Tabela 11 - Escala de vulnerabilidade referente à intensidade pluviométrica..	67
Tabela 12 - Dados climáticos referentes ao município de Aparecida D'Oeste - SP	68
Tabela 13 - Classes do fator uso e cobertura do solo	74
Tabela 14 - Graus de vulnerabilidade e a respectiva área ocupada da bacia..	82
Tabela 15 - Quantidade e densidade de processos erosivos por grau de vulnerabilidade.....	84
Tabela 16 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes de Uso e Cobertura do solo	85
Tabela 17 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes pedológicas	86
Tabela 18 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes geológicas	86
Tabela 19 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para o fator Declividade	87
Tabela 20 - Perdas de solo estimadas na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú	88
Tabela 21 - Forma de classificação de Perda de Solo sugerida em outros trabalhos	94
Tabela 22 - Área ocupada e quantidade e densidade de processos erosivos por classe de perda de solo	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (continua).....	42
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO.....	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	EROSÃO	15
2.1.1	Natureza da erosão.....	15
2.1.2	Agentes erosivos.....	17
2.1.2.1	A água	17
2.1.2.2	Outros agentes erosivos	19
2.1.3	Tipos de processos erosivos.....	20
2.1.4	Fatores que influem na erosão	22
2.1.4.1	Chuva	22
2.1.4.2	Solo	23
2.1.4.3	Relevo	25
2.1.4.4	Cobertura do solo	28
2.1.5	Estudos sobre erosão	29
2.1.5.1	<i>Métodos de pesquisa existentes</i>	29
2.2	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	40
2.3	BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE ESTUDO	46
2.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.1	MATERIAIS.....	52
3.2	METODOLOGIAS	53
3.2.1	Cálculo da Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE).....	54
3.2.1.1	Geologia (G).....	56
3.2.1.2	Geomorfologia (R).....	57
3.2.1.3	Solos (S).....	63
3.2.1.4	Uso e Cobertura do Solo (U).....	64
3.2.1.5	Clima (C).....	66
3.2.1.6	Geração do mapa de vulnerabilidade à erosão.....	67
3.2.2	Aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE).....	68
3.2.3	Comparação com registros de ocorrência de processos erosivos	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1	VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO (VNE).....	78

4.2	EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)	88
4.3	VISITA A CAMPO	97
5	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o ambiente é um assunto recorrente nos últimos anos tanto no âmbito científico quanto entre os tomadores de decisões em todas as escalas. Os problemas ambientais deixaram de ser apenas consequências esperadas do crescimento econômico e populacional e passaram a integrar o foco de inúmeras discussões. Entre as diversas questões sendo debatidas, destaca-se a erosão.

A erosão caracteriza-se pela desagregação de partículas de solo, seguida pelo transporte dessas partículas para outros locais, e se dá através de diversos tipos de processos erosivos causados por diferentes agentes, como água, geleiras, vento, e até plantas e animais.

Nesse contexto, destaca-se a importância da erosão hídrica por estar presente em muitos locais por todo o globo terrestre, nos mais diversos tipos de climas, latitudes e altitudes, sendo considerada por Bertoni e Lombardi Neto (1999), inclusive, o mais importante agente de erosão existente.

Os processos erosivos podem aparecer em diferentes configurações, como de forma laminar, em sulcos, ravinas ou voçorocas, como serão definidos e exemplificados posteriormente. As causas desse fenômeno também são diversas, envolvendo tanto fatores naturais – pluviosidade, clima, relevo, entre outros – quanto antropogênicos, como ocupação do solo e técnicas de manejo.

É importante ressaltar que a erosão do solo não é um processo que surgiu com o desenvolvimento da civilização moderna, muito pelo contrário, esse fenômeno existe desde a formação da superfície terrestre e é responsável em grande parte pelo formato atual do relevo da Terra. No entanto, enquanto os processos de desagregação e deposição de partículas do solo eram regidos apenas por fatores naturais, havia um equilíbrio entre eles, que foi quebrado pela entrada do ser humano nessa equação. Através da exploração e ocupação, o homem alterou o cenário existente, intensificando alguns processos erosivos, amenizando outros, e ainda criando outros totalmente novos.

A partir da interferência antrópica, surgiu então a denominada erosão acelerada, que pode ser entendida como a erosão intensificada devido à ação humana direta ou indireta. Esse tipo de fenômeno, além de ser uma forma de degradação ambiental por si só, ainda provoca outros tipos de problemas, como

a diminuição da produção de alimentos, a desertificação de áreas, o assoreamento de rios, o deslizamento de solo, entre outros.

Dessa forma, o estudo dos processos erosivos e suas consequências é de fundamental importância em diversas áreas do conhecimento, exatamente para que possam ser propostas formas de remediar os casos já existentes e prevenir possíveis próximas ocorrências. Há, portanto, toda uma área da ciência dedicada à investigação e previsão de locais propensos ao aparecimento de processos erosivos, frequentemente chamados de estudos de suscetibilidade à erosão.

As pesquisas feitas nesse sentido podem ter diferentes objetivos finais, devido às diversas consequências da erosão e da interdisciplinaridade do assunto, e podem partir de diferentes princípios, de acordo com os critérios adotados e a área de estudo. Os parâmetros utilizados para a análise podem ser diversos e diferirem bastante entre uma pesquisa e outra, devido a, por exemplo, disponibilidade de dados, particularidades do local de estudo, nível de precisão requerido, e finalidade do estudo.

Devido aos fatores mencionados, há uma gama de variáveis envolvendo a modelagem de processos erosivos e estudos focando o potencial para ocorrência de processos erosivos, de forma que mesmo havendo muitos estudos quanto ao assunto em diversos países, ainda há necessidade de serem feitas mais pesquisas para áreas específicas, tendo em vista a grande variabilidade dos critérios envolvidos em cada caso e de área para área na modelagem.

Entre os parâmetros mais utilizados no estudo de suscetibilidade à erosão estão aqueles relacionados à chuva, à cobertura vegetal, à topografia, e aos tipos de solos (SALOMÃO, 1999).

Desde o princípio da exploração e desbravamento das terras paulistas deu-se início à mudança no uso e ocupação do solo, destacando-se a expansão da fronteira agropastoril. Com isso, muitas áreas que antes possuíam densa cobertura vegetal, como florestas tropicais, hoje são ocupadas por monoculturas, pastagens ou tem seu solo exposto, isso sem contar as áreas pavimentadas e urbanas. Essa mudança no uso do solo aumentou a vulnerabilidade à erosão em muitos locais, pois ao substituir a vegetação nativa por outra menos densa, houve também um declínio quanto à proteção do solo contra o impacto da gota de chuva e o escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

Dessa forma, no presente trabalho será analisada a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú, localizada no noroeste do estado de São Paulo, no município de Aparecida D'Oeste, e pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados. A partir de diversas metodologias e parâmetros, serão aplicados diferentes modelos para avaliar o potencial da área para a instalação de processos erosivos. Através desses modelos espaciais poderão ser identificadas as áreas dentro da bacia com maior e menor suscetibilidade à erosão, e essa distribuição poderá então ser comparada às ocorrências reais de processos erosivos para que seja verificada a aplicabilidade dos métodos estudados, além de serem identificados quais deles mais se adequam à realidade local.

Toda a modelagem de dados foi feita utilizando sistemas de informações geográficas (SIG), que não só simplificam o processo de criação dos modelos, como facilitam as análises espaciais e comparativas.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi testar abordagens de avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú, em Aparecida D'Oeste – SP, por meio de diferentes metodologias, e envolvendo diversos parâmetros naturais e antrópicos, ponderados ou não entre si, de forma a discutir sua aplicação à área estudada.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar o método da Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE), segundo proposto por Crepani *et al.* (2001), distribuído espacialmente pela bacia;
- Analisar a distribuição da perda de solo na área através de adaptações da Equação Universal da Perda de Solo (USLE);
- Comparar resultados obtidos a partir das diferentes metodologias de estudo com registros de processos erosivos na bacia de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EROSÃO

Não há um consenso entre os autores sobre a definição exata do termo “erosão”. De acordo com Lal (1984), muitos autores definem esse termo de uma forma bem abrangente, que seria aproximadamente um “desgaste do solo”, porém ele mesmo prefere defini-lo apenas como “destacamento ou arraste de partículas do solo” para diferenciar esse processo da sedimentação ou do transporte de sedimentos. Zachar (1982) utiliza o termo “erosão” como sendo a ruptura do manto do solo ou da rocha subjacente pela ação de fatores geomórficos externos. Já Bertoni e Lombardi Neto (1999) são mais específicos, afirmando que a erosão é “o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento”.

Assim, apesar das definições não serem idênticas, elas partem do mesmo princípio, podendo-se então resumir essas descrições considerando a erosão como o desprendimento e arraste de partículas do solo causados por agentes externos, especialmente a água e o vento.

A classificação dos tipos de erosão também pode ser feita de diversas maneiras, sendo mais usuais as classificações pela natureza da erosão, pelo tipo de agente erosivo, e pela forma da erosão.

2.1.1 Natureza da erosão

Um dos possíveis tipos de classificação de erosão do solo pode ser a diferenciação entre natural ou geológica e acelerada (BENNET, 1939, citado por ZACHAR, 1982). A erosão natural ou geológica, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), é aquela que ocorre normalmente através dos processos de modificação da crosta terrestre, tão antiga quanto a própria Terra, e só reconhecível com o passar de longos períodos de ocorrência.

Esse tipo de erosão é responsável pela formação de grande parte dos relevos existentes (RUHE, 1969, citado por NEARING *et al.*, 2017), como planícies, vales e colinas.

No entanto, há um consenso no meio científico de que as atuais taxas de erosão (de forma global) são maiores do que em épocas passadas, antes da introdução da ação antrópica, e, especialmente, antes do surgimento da agricultura intensiva. Evidências científicas mostram que as civilizações modernas causaram uma taxa de erosão extremamente acelerada nas terras produtivas do mundo (NEARING *et al.*, 2017).

Naturalmente a erosão é compensada pelo processo de formação do solo, sendo essa taxa considerada também como a tolerância de perda do solo (GHAFARI *et al.*, 2017). Porém quando a perda de solo devido a processos erosivos excede a taxa de formação de solo, especialmente devido às atividades antrópicas como o desmatamento e a agricultura, surge a denominada erosão acelerada (LAL, 2019).

A erosão acelerada, como o próprio nome sugere, trata-se de um processo erosivo intensificado, acelerado, tendo na maioria das vezes o ser humano como seu principal responsável, devido ao crescimento populacional, necessidade de produção de cada vez mais alimento e consequente mudanças no uso do solo (NEARING *et al.*, 2017).

Assim, apesar de erosão do solo ser considerada uma das maiores ameaças à sustentabilidade econômica e ambiental em todo o planeta, de acordo com Noori, Siadatmousavi e Mojaradi (2016), a atividade humana continua sendo a principal causa de mudança no uso do solo e consequente aumento da erosão acelerada.

Entretanto, deve-se notar que a influência da ação humana nos processos erosivos, apesar de predominantemente negativa, não se limita à intensificação dos mesmos, sendo possível, por exemplo, que técnicas de manejo recuperem áreas erodidas, ou que áreas agrárias desmatadas sejam deliberadamente transformadas em florestas novamente (ZHANG *et al.*, 2017). Este é, inclusive, um dos objetivos de diversos estudos: verificar quais ações trariam melhor benefício quanto à redução de processos erosivos, e de que forma elas seriam melhor aplicadas.

Além disso, existem eventos naturais extremos que podem alterar repentinamente a taxa natural de erosão de uma determinada região, como terremotos, tsunamis, grandes tempestades e secas severas, sendo esse tipo

de erosão também chamada de “acelerada” por alguns autores (BARROW, 1994).

Assim, observa-se que a erosão acelerada não é única e exclusivamente causada pelo ser humano e nem este está necessariamente fadado a originá-la, porém é unanimidade entre os autores o fato de que o ser humano é incontestavelmente o principal responsável pela erosão acelerada, sendo os outros casos tidos como exceções à regra. Dessa forma, neste trabalho o termo “erosão acelerada” será considerado como referente aos processos erosivos intensificados devido à ação direta ou indireta do homem.

2.1.2 Agentes erosivos

Os agentes erosivos são aqueles responsáveis por gerar a erosão. Barrow (1994) divide essas causas de erosão em dois grupos: abióticas e bióticas. O primeiro refere-se a processos inanimados, sendo os principais agentes a água e o vento, enquanto o segundo inclui as atividades praticadas por seres vivos, especialmente os seres humanos. Esses dois tipos de fatores responsáveis pela erosão podem atuar separadamente ou em conjunto, ao mesmo tempo ou diferentes espaços de tempo.

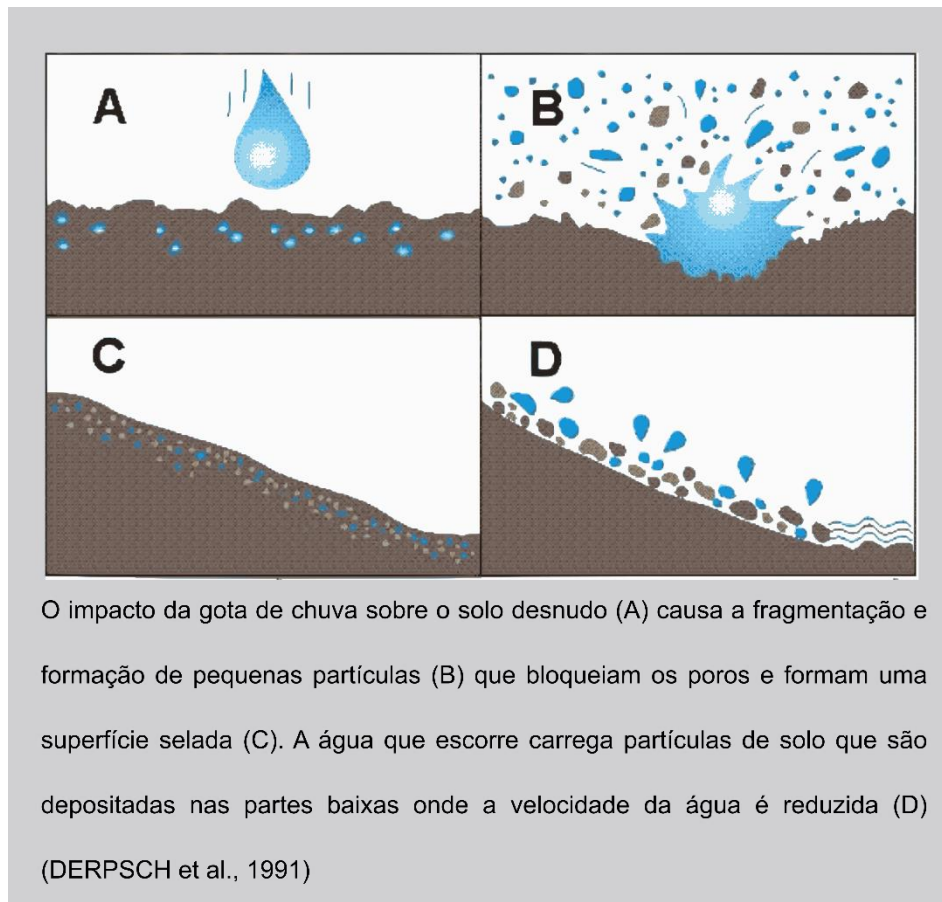
Entre os agentes erosivos citados por Briak *et al.* (2016) estão a água, o vento, geleiras, ferramentas de trabalho, gravidade, entre outros.

2.1.2.1 A água

A erosão hídrica abrange os processos ocasionados pelas gotas de chuva e pelo escoamento de águas fluviais, subterrâneas e não-fluviais (especialmente a água do mar). Por essa razão pode-se considerar ainda uma subdivisão entre a erosão marítima ou marinha, que pode referir-se tanto aos fenômenos ocorridos no solo oceânico quanto na costa, e a erosão continental ou terrestre, que pode ser tanto aquela formada a partir de precipitação (seja de chuva, neve ou granizo), como a causada por rios e lagos (ZACHAR, 1982). O primeiro estágio do processo erosivo causado pela água da chuva, segundo Guerra (1999), é a erosão por salpicamento, ou a ação do *splash*, como é chamado o resultado do impacto da gota de chuva no solo. O *splash* pode gerar a ruptura

dos agregados, que ao preencherem os poros da superfície do solo, acabam por selar a mesma, diminuindo assim sua porosidade e aumentando o escoamento superficial, como pode ser observado no esquema da Figura 1.

Figura 1 - Fases do processo de erosão



Fonte: adaptado de Universidade de São Paulo – USP (2018)

Quando a precipitação ultrapassa a capacidade de infiltração do solo, este começa a se saturar, e há o início da formação de poças em depressões da superfície, até o momento em que surgem as enxurradas (GUERRA, 1999). O escoamento superficial, ou as enxurradas, atuam então desagregando e arrastando as partículas superficiais do solo.

Bertoni e Lombardi Neto (1999) complementam ainda que, apesar da tendência comum de imaginar que a contribuição da chuva para o processo erosivo é meramente a formação da enxurrada, a principal causa da erosão do solo pela água em terrenos descobertos é o impacto da gota de chuva no solo e

o desprendimento de partículas resultante, de forma que esse tipo de processo erosivo não deve ser subestimado.

2.1.2.2 Outros agentes erosivos

Apesar de alguns autores considerarem a erosão eólica tão importante para o solo quanto a erosão hídrica, Barrow (1994) já notava uma disparidade entre as pesquisas desses dois tipos de processos, havendo menos estudos sobre a erosão eólica. Essa constatação é ainda reafirmada por Du *et al* (2016).

A erosão eólica, ocasionada pelo vento, ocorre principalmente em regiões áridas ou semi-áridas. Esse fenômeno pode ser influenciado por diversos fatores, como altas temperaturas, baixa precipitação, além da velocidade do vento e densidade da vegetação (SHARRATT *et al.*, 2015).

Entre as áreas atingidas por esse tipo de erosão estão o norte da África, Austrália, algumas regiões da Ásia (como a China), da Europa e do continente Americano. No Brasil a ocorrência desse tipo de erosão é mais pronunciada no Nordeste e na região Sul (ACOSTA-MARTINEZ, *et al.*, 2015).

Em contraposição existem também os agentes que atuam nas regiões extremamente frias causando, por exemplo, erosão nival em áreas permanentemente cobertas por neve (principalmente devido às avalanches) e erosão glacial provocada pelo lento movimento das geleiras (ZACHAR, 1982).

Há ainda a erosão orgânica causada por plantas, também chamada de erosão fitogênica, e aquela originada por animais, que pode ser denominada erosão zoogênica. Além disso, Zachar (1982) considera o homem como um agente erosivo independente, porém define que a erosão antropogênica não pode ser considerada como um tipo independente de erosão. Isso porque na realidade toda erosão é causada pela atividade destrutiva de um agente natural, e o que o homem faz é interferir nesses processos, potencializando indiretamente o efeito desses fatores primordialmente causadores da erosão.

Assim, em relação aos agentes erosivos, o que difere a erosão antropogênica das outras já citadas anteriormente é o fato de o ser humano ser o principal agente responsável pela erosão, no sentido de que se ele não interferisse a erosão não aconteceria. No entanto, em qualquer circunstância, o agente que efetivamente causa a erosão (que poderia até ser chamado de

operador da erosão) ainda será a água, o vento, ou algum dos outros agentes naturais já mencionados. Dessa forma, em um determinado local pode haver um processo erosivo que é antropogênico, além de hídrico ou eólico, ou ainda ambos, por exemplo.

Entre as principais atividades humanas que afetam o desenvolvimento da erosão estão aquelas relacionadas à mudança do uso e da cobertura do solo. O desmatamento da vegetação nativa, a utilização de fogo para limpeza do solo, o sobrepastoreio, e uso intensivo para agricultura, são algumas dessas atividades, deixando o solo exposto ou introduzindo culturas ou outros tipos de vegetação que fornecem uma proteção inferior à cobertura vegetal natural, além de alterar as propriedades do solo.

Além dessas, há ainda outras práticas adotadas pelo homem que influenciam o aparecimento de erosões em áreas urbanas, como a pavimentação, loteamentos, impermeabilização do solo, ocupação de encostas, entre outras, como trata Sena (2008).

2.1.3 Tipos de processos erosivos

A avaliação da forma das erosões é de extrema importância, pois a partir dessa análise muitas vezes é possível determinar qual foi a causa do processo erosivo, como ele se desenvolveu, qual sua intensidade, e até mesmo o que pode ser feito para controlá-lo ou recuperar o solo erodido (ZACHAR, 1982).

Apesar da relevância desse tipo de estudo, não há uma classificação universal de erosões quanto a forma. A depender do país, do idioma e do autor da pesquisa, podem ser encontradas diversas categorizações distintas.

A princípio pode-se estipular que há diferença entre o formato dos processos erosivos dependendo do agente erosivo que o origina. Assim, por exemplo, a classificação das formas de erosão causadas pela precipitação é diferente da classificação utilizada para erosões eólicas.

Outra diferenciação ocorre também entre erosões superficiais e subterrâneas, ou subsuperficiais. O fenômeno do “piping”, por exemplo, ou erosão em túnel, ocorre a partir do arraste de partículas através da percolação formando canais subsuperficiais a partir das paredes e dos fundos das erosões (SENA, 2008).

Como a erosão causada pela precipitação é uma das principais áreas de interesse no estudo da erosão hídrica do solo (MOREIRA *et al.*, 2006), especialmente no contexto brasileiro, e mais precisamente na região de estudo e seus entornos (estado de São Paulo), ela será a única a ser detalhada a respeito da classificação quanto ao formato de processos erosivos.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), existem três formas de erosão hídrica: laminar, em sulcos e voçorocas. Observa-se ainda que esses tipos de erosão podem acontecer de forma simultânea em uma mesma área. A classificação entre esses três tipos de processos erosivos está relacionada à concentração do escoamento superficial – ou da enxurrada – na superfície do solo.

Segundo os autores, assim como afirma Beskow (2009), enquanto a água está apenas “lavando” a superfície do solo, removendo finas camadas deste, a erosão pertinente é a laminar. Este tipo de erosão é especialmente ruim do ponto de vista agrícola, pois as partículas mais leves e que contém a maior parte dos nutrientes são as primeiras a serem arrastadas, diminuindo a fertilidade e produtividade do solo. Já quando ocorre uma concentração do escoamento devido às irregularidades na superfície do terreno, e a água escorre em pequenos sulcos no solo, formando perceptíveis riscos no mesmo, trata-se da erosão em sulcos. Se os sulcos continuarem sendo erodidos de forma pronunciada tanto em profundidade quanto em largura por concentrações cada vez maiores de enxurradas, chega um momento em que essas erosões se tornam voçorocas, que podem chegar a centenas de metros de comprimento e dezenas de metros de profundidade.

Outros autores brasileiros categorizam as formas de erosão de maneiras semelhantes, porém não iguais. Um popular tipo de diferenciação é entre erosão laminar e linear. De acordo com Salomão (1999), o primeiro refere-se à mesma erosão laminar citada anteriormente, causada a partir do escoamento difuso da água da chuva e removendo de forma relativamente uniforme os horizontes superficiais do solo. Já a erosão linear é aquela causada devido à concentração das linhas de fluxo do escoamento superficial, podendo ser subdivididas entre erosão em sulcos, ravinas e voçorocas. Nessa concepção, o primeiro estágio da erosão linear é a erosão em sulcos, que pode aumentar de tamanho, especialmente em profundidade, e se tornar uma ravina. Caso o

desenvolvimento da erosão se dê não apenas pelas águas superficiais, mas também por fluxos de água subsuperficiais, como o lençol freático – quando costuma-se dizer que a erosão chegou ao lençol –, esse processo erosivo pode ser denominado voçoroca, ou boçoroca (SENA, 2008).

Guerra (1999) defende ainda a utilização do critério dimensional na distinção entre ravinas e voçorocas. De acordo com esse parâmetro, incisões erosivas de até 50 centímetros de largura e profundidade seriam consideradas ravinas, e incisões maiores do que estas seriam denominadas voçorocas.

2.1.4 Fatores que influem na erosão

A erosão é causada por diversas forças que são resultado de outros tantos fatores e condicionantes do ambiente em que ocorrem. Ao falar-se de erosão hídrica, é indiscutível o fato de que a chuva é um dos principais fatores que influenciam a ocorrência dos processos erosivos.

Além disso, o volume e a velocidade da enxurrada são características determinantes para a atividade erosiva, e ambos variam não só com a chuva, mas também com o relevo do terreno e com as propriedades do solo. Estas últimas determinam tanto a capacidade deste de absorver a água, quanto sua resistência às ações erosivas. Por fim, a cobertura vegetal do solo também influencia na resistência à erosão, tanto no momento do impacto da gota de chuva, quanto durante o escoamento superficial.

2.1.4.1 Chuva

O clima de uma forma geral é um elemento que afeta a erosão hídrica. O vento pode alterar o ângulo de quedas das gotas de chuva e influir na evaporação, e a temperatura também influencia na evapotranspiração, porém o componente do clima mais importante no processo erosivo é a chuva (GALETI, 1984).

A primeira forma como a chuva afeta a erosão é através do impacto das gotas de chuva no solo, que desagrega partículas do solo e as lança a certa distância. A segunda forma é através da contribuição para a enxurrada, ou

escoamento superficial. Quanto maior a velocidade e volume da enxurrada, maior a capacidade de erosão desse evento.

O volume e a velocidade do escoamento são elementos que dependem da intensidade, frequência e duração da chuva, sendo a intensidade, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999) o fator mais relevante. Já Machado *et al.* (2017) definem que as características da precipitação que mais impactam na erosão do solo são, primeiramente, a intensidade e duração, e em seguida o diâmetro e a velocidade final das gotas de chuva. Beskow *et al.* (2009) citam também a intensidade e a dimensão da gota de chuva como fatores que influem na capacidade erosiva.

Intensidade e duração determinam a chuva total. Para uma mesma chuva total, quanto maior a intensidade desta, maior a sua capacidade erosiva. Ainda, para chuvas de mesma intensidade, ou para uma chuva de intensidade uniforme, a influência da duração se dá devido ao fato de que, a princípio, ocorre a infiltração por um determinado período e só então começa a ser formada a enxurrada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

Além disso, a frequência das chuvas afeta a erosão em virtude do teor de umidade do solo e conseqüente capacidade de absorção de água do mesmo. Exemplificando-se, quando há um intervalo curto entre chuvas, o solo pode estar ainda com um alto teor de umidade, saturando-se rapidamente ou até mesmo já estando saturado, de modo que a formação das enxurradas será mais rápida e estas serão mais volumosas. Já quando o intervalo entre chuvas é longo e o solo está seco, em uma chuva de baixa intensidade é possível que nem mesmo haja formação de escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

Assim, em razão de todos esses parâmetros relativos à precipitação que influenciam a ocorrência de processos erosivos, é usual utilizar-se de um índice que engloba esses fatores e expressa exclusivamente a capacidade da chuva de provocar erosão. Esse índice é denominado erosividade (SALOMÃO, 1999).

2.1.4.2 Solo

O solo exerce grande influência na ação de processos erosivos através de suas propriedades físicas – especialmente textura, estrutura, permeabilidade e densidade –, químicas, biológicas e mineralógicas.

A textura, que pode ser entendida como o tamanho das partículas, afeta diretamente tanto a infiltração da água pelo solo, e conseqüentemente a formação de enxurradas, quanto a resistência ao arraste de partículas. De acordo com Salomão (1999), solos arenosos são geralmente mais porosos, havendo, portanto, uma maior facilidade na absorção da água, o que retarda a formação de escoamento superficial ou até mesmo o inibe, em casos de chuva de pequena intensidade, por exemplo. Apesar disso, ao ocorrerem as enxurradas, mesmo que em pequeno volume, estas facilmente arrastam grandes quantidades de partículas do solo arenoso, pois a ação de ligação entre essas partículas maiores é feita pelas partículas argilosas, menores, que o solo arenoso possui em baixa proporção.

Enquanto isso, solos de textura argilosa possuem uma reduzida capacidade de infiltração devido a sua menor porosidade, facilitando a formação de escoamento superficial. No entanto, em razão da grande coesão entre as partículas, os solos argilosos são também mais resistentes ao desprendimento das partículas superficiais, e à ação erosiva de forma geral.

A estrutura do solo pode ser definida como a forma que as partículas do solo se arranjam, e assim como a textura, ela também influi tanto na absorção da água pelo solo como na resistência à remoção e ao arraste das partículas. A estrutura pode ser afetada tanto pela forma como a argila interage e mantém a estabilidade dos agregados, quanto pela ação da matéria orgânica em decomposição que também gera coesão entre as partículas. Além disso, o manejo do solo pode ter grande influência na estrutura deste, sendo a aração uma atividade que favorece a absorção da água (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

A permeabilidade também está diretamente relacionada à porosidade do solo, afetando, portanto, a taxa de infiltração do mesmo. Assim, geralmente solos arenosos são mais permeáveis que os argilosos, pois são mais porosos, porém, no caso de estruturas específicas em que um solo argiloso é altamente poroso, ele também será mais permeável (SALOMÃO, 1999).

A densidade do solo – relação entre sua massa total e volume – é inversamente proporcional à porosidade e à permeabilidade. Dessa forma, segundo Salomão (1999), quando o solo é compactado, há uma diminuição de seus macroporos, e o solo se torna então mais erodível.

Além disso, uma característica importante de ser analisada em um solo é a sua espessura. Quanto mais raso o solo, mais rapidamente ele é saturado, facilitando assim o desenvolvimento do escoamento superficial.

Por fim, outra análise importante a ser feita é quanto ao gradiente textural entre os horizontes superiores do solo. O gradiente textural pode ser compreendido como a relação entre os teores de areia e argila entre os horizontes analisados. Assim, solos com alto gradiente textural apresentam o horizonte A muito mais arenoso do que o horizonte B. Dessa maneira, geralmente solos com alto gradiente textural são mais suscetíveis à ocorrência de processos erosivos. Isso ocorre porque, ao possuir uma maior proporção de argila, o horizonte B atua como um obstáculo à infiltração, acelerando a saturação do horizonte A e aumento do fluxo de água logo abaixo da superfície, o que favorece a ocorrência de escoamento superficial e conseqüentemente propicia o arraste de partículas e desenvolvimento de processos erosivos, devido ao caráter mais arenoso do horizonte A (SALOMÃO, 1999).

2.1.4.3 Relevo

O relevo, também apresentado como a topografia do terreno, exerce grande influência sobre a erosão principalmente através dos fatores declividade, comprimento de rampa e forma da encosta.

Todos os parâmetros são determinantes para o volume e velocidade do escoamento superficial e, portanto, para a capacidade erosiva da enxurrada. Outra influência é quanto ao tamanho e quantidade de partículas que podem ser arrastadas pela água.

Partindo do princípio de que a capacidade erosiva pode ser compreendida como a energia cinética decorrente do escoamento, Bertoni e Lombardi Neto (1999) observam que a energia cinética aumenta com a velocidade do escoamento e esta, por sua vez, varia conforme a distância vertical percorrida pela enxurrada. Ainda segundo os autores, a quantidade de material que pode ser arrastado pela enxurrada e o tamanho dessas partículas também são funções da velocidade do escoamento. Assim, através da relação entre os parâmetros citados, e considerando-se apenas a influência da topografia do terreno, se o declive de um local aumentar quatro vezes, a velocidade do

escoamento é duplicada, a capacidade erosiva é quadruplicada, a quantidade de material arrastado pode aumentar 32 vezes e o tamanho das partículas transportadas pode aumentar até 64 vezes.

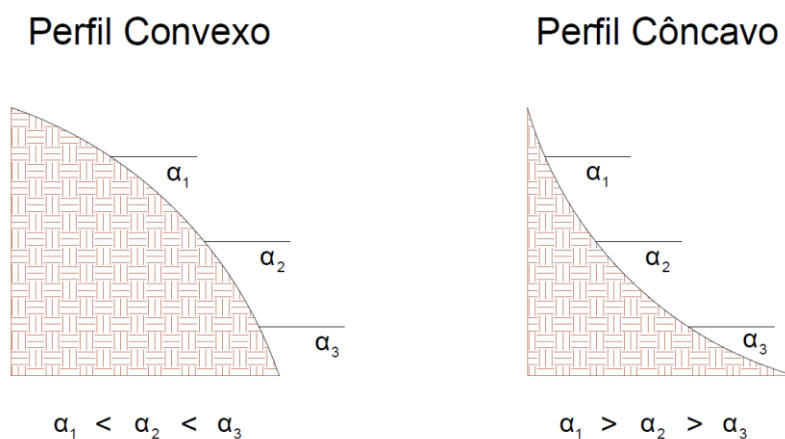
A importância do comprimento de rampa também está ligada ao aumento do volume e velocidade do escoamento, pois conforme o caminho percorrido pela água em uma encosta aumenta, a enxurrada vai se avolumando e há uma progressiva evolução de sua velocidade, causando os mesmos efeitos da intensificação da energia resultante citados acima.

Ao quadruplicar-se o comprimento de rampa, as perdas de solo por unidade de área quase se triplicam. Ainda para mostrar a importância desse fator em relação à declividade, eles exemplificam que a perda de solo em uma área com 20 metros de comprimento e 20% de declividade é a mesma que em um terreno de 180 metros de comprimento e com um declive de somente 1% (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999).

Quanto à forma da encosta, este parâmetro nem sempre é considerado em estudos sobre a erosão, porém sua influência nos processos erosivos é inegável. Sua importância se dá, assim como os outros dois fatores já citados, devido à sua influência na quantidade e velocidade do escoamento, sendo que em vertentes convexas o escoamento superficial é geralmente maior a jusante do que a montante, e nas vertentes côncavas o processo se inverte. Isso acontece, de acordo com Sena (2008), pois enquanto formas convexas tendem a provocar um aumento de declividades locais em direção à base da encosta, e a concentrar o fluxo em determinadas direções, formas côncavas propiciam uma diminuição das declividades locais e uma concentração de fluxo em direção ao centro da base da encosta. As Figuras 2 e 3 exemplificam o processo.

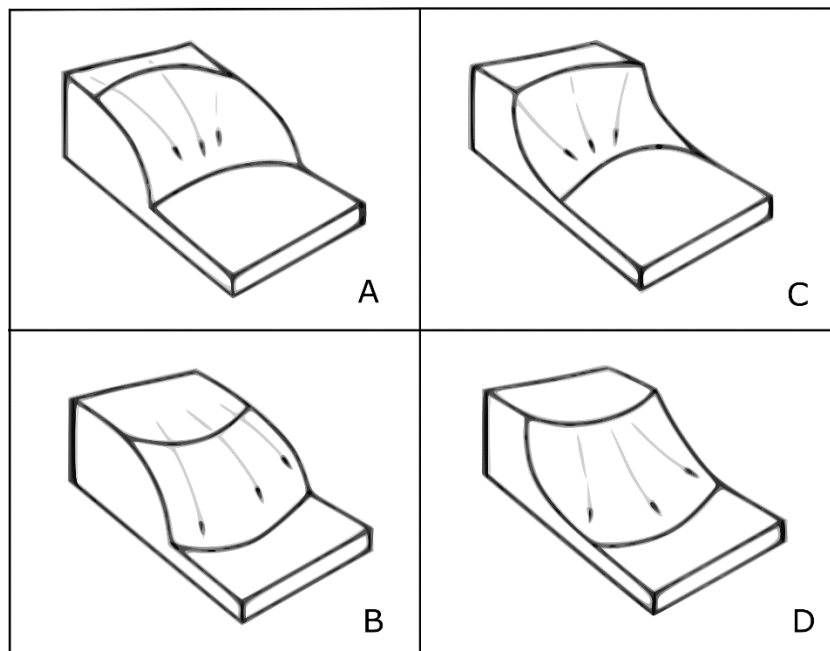
Lima (2003) traz ainda uma ampla revisão sobre os parâmetros que permeiam a temática de estudos sobre processos erosivos, apresentando diversos trabalhos que demonstram a relevância da forma da encosta. Entre as conclusões apontadas, está a de que em encostas convexas há um aumento da velocidade de fluxo de escoamento, desagregação de partículas, e capacidade de transporte, propiciando o aparecimento de processos erosivos, enquanto em encostas côncavas há uma redução da velocidade de fluxo, provocando assim a deposição.

Figura 2 - Perfis de encosta e a relação com o ângulo de escoamento



Fonte: autoria própria

Figura 3 - Perfis de encosta convexo com curvas de nível côncavas (A), convexo com curvas de nível convexas (B), côncavo com curvas de nível côncavas (C), e côncavos com curvas de nível convexas (D)



Fonte: adaptado de Troeh (1965)

Deve-se notar que os cálculos da capacidade erosiva e perda de solo com base na declividade e comprimento de rampa podem variar conforme as metodologias de estudo utilizadas e o local avaliado, porém a grande relevância desses fatores é evidente.

2.1.4.4 Cobertura do solo

A cobertura vegetal é um fator de extrema importância na proteção do solo contra a erosão e pode atuar de diversas maneiras simultaneamente, agindo como uma defesa natural do terreno.

A vegetação protege o solo contra o impacto direto das gotas de chuva, aumenta a taxa de infiltração em razão dos poros formados pela ação das raízes, atua na dispersão e diminuição da velocidade do escoamento superficial, aumenta a capacidade de retenção de água do solo devido à melhora de sua estruturação e presença de matéria orgânica, entrelaça o solo e fornece uma ligação mecânica entre suas partículas, diminui as flutuações microclimáticas na superfície do solo, e até melhora propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999; ZACHAR, 1982).

Dessa forma, nota-se a relevância da vegetação na proteção contra a erosão e percebe-se que um solo exposto, sem qualquer cobertura vegetal, é mais propenso à ação de processos erosivos do que aquele que apresenta algum tipo de vegetação.

Além disso, a proteção do solo pela cobertura vegetal, e consequentemente as perdas de solo nesses terrenos, variam de acordo com o tipo de vegetação existente no local. A perda de solo em um terreno coberto por pastagem é, por exemplo, maior do que em uma área coberta pela mata, e pode ser maior ou menor do que em uma plantação. Há ainda diferença entre a proteção do solo fornecida por culturas distintas – como soja, cana-de-açúcar, milho –, o que incentiva a adoção de algumas práticas conservacionistas, como o plantio em faixas alternando culturas (ZHANG *et al*, 2017).

É observado ainda por Zachar (1982) que o efeito da cobertura vegetal a partir de culturas depende de seu ciclo de crescimento, pois enquanto a planta cresce ela fornece diferentes graus de proteção, havendo períodos, inclusive, em que não há proteção alguma, como durante o plantio ou enquanto o solo está sendo preparado para ele.

Ademais, Salomão (1999) destaca que diferentes práticas conservacionistas e o uso e manejo do solo também podem influenciar na proteção contra processos erosivos atribuída à cobertura vegetal.

2.1.5 Estudos sobre erosão

Os tipos de estudos relacionados à ocorrência de erosões podem ser os mais diversos, analisando desde os agentes erosivos até as formas de controle de erosão, tanto a caráter preventivo quanto remediativo, e com diferentes objetivos específicos. Entre esses estudos estão aqueles que analisam a intensidade da erosão, seus efeitos qualitativos no solo, sua distribuição, a eficácia dos métodos de controle, entre outros (BESKOW *et al*, 2009; LAL, 2019; ZHANG *et al.*, 2017).

Além disso, mesmo estudos com objetivos finais similares podem conter abordagens diferentes, devido às especificidades da área, ao tamanho da área de estudo, à precisão buscada, ou mesmo devido à disponibilidade de recursos do pesquisador (AIELLO; ADAMO; CANORA, 2015).

O estudo da suscetibilidade à erosão, de acordo com Zachar (1982), é aquele que analisa principalmente a resistência do solo aos efeitos dos agentes erosivos, podendo ainda englobar vários outros fatores como o efeito da chuva, a topografia e a atividade humana. O autor reforça ainda que a habilidade do solo de resistir à degradação causada pelos processos erosivos é denominada erodibilidade, o que é diferente do potencial erosivo ou risco de erosão, que são conceitos mais amplos.

O potencial de erosão de uma área não consiste em um tipo específico de estudo, e nem possui definições precisas ou parâmetros de estudo obrigatórios. Na realidade, pesquisas alinhadas a esse conceito visam a analisar áreas quanto à sua propensão ao aparecimento de processos erosivos e podem se utilizar de diversos critérios tanto durante a metodologia de pesquisa quanto na análise dos resultados.

2.1.5.1 Métodos de pesquisa existentes

A simulação e avaliação da erosão do solo pode ser realizada de diversas maneiras, havendo dois principais grupos de metodologias. Os modelos empíricos são conhecidos pela simplicidade e facilidade de aplicação, devido à limitada exigência de dados. Já os modelos físicos almejam a reprodução real dos processos envolvidos no aparecimento e desenvolvimento da erosão,

requerendo, assim, uma grande quantidade de dados referentes a cara parâmetro implicado no processo. Dessa forma, percebe-se que os modelos físicos são adequados apenas a pesquisas em pequena escala, e mesmo assim a falta de dados pode ser um empecilho para o sucesso do experimento (AIELLO; ADAMO; CANORA, 2015).

Uma das metodologias empíricas mais difundidas e utilizadas no campo do estudo do potencial de ocorrência de erosões é a Equação Universal de Perdas de Solo, ou USLE (sigla referente ao termo em inglês Universal Soil Loss Equation), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978).

O objetivo desta equação é prever a taxa média de perda de solo devido ao escoamento superficial durante longos períodos em uma área específica com determinado uso do solo e sistema de cultivo. Devido à simplicidade dos parâmetros de entrada exigidos e da fácil implementação do modelo, este se popularizou (DESMET; GOVERS, 1996; MEDEIROS *et al.*, 2016).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), a Equação Universal de Perda de Solo consiste na avaliação da perda de solo a partir de seis fatores, expressos da seguinte forma:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{Equação 1})$$

sendo:

A = perda de solo calculada por unidade de área ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$);

R = erosividade da chuva ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$);

K = erodibilidade do solo ($\text{ton} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$);

LS = fator topográfico (adimensional);

C = uso e cobertura do solo (adimensional);

P = práticas conservacionistas (adimensional).

Entre alguns trabalhos recentes que se utilizaram da USLE está Graça *et al.* (2015), que estudaram a perda de solo na bacia do Rio Mourão, no estado do Paraná, uma bacia rural cujos tipos de uso do solo predominantes são as lavouras temporárias e pastagens durante todo o período analisado. Este estudo comparou o potencial natural de ocorrência de erosão – entendido como a influência do fator topográfico, erosividade, e erodibilidade – com o resultado

obtido através USLE, de modo a estimar como os fatores antrópicos – uso do solo e práticas conservacionistas – intensificam ou diminuem a perda de solo.

Medeiros *et al.* (2016) desenvolveram também um estudo a partir da Equação Universal de Perda de Solo com o objetivo de apresentar as estimativas de perda de solo mais recentes para todo o estado de São Paulo a partir de dados com resolução espacial de 30 metros. Os resultados encontrados foram comparados ainda à tolerância de perda de solo, ou “T-value”, definida por Wischmeier e Smith (1978) como a máxima taxa de perda de solo por erosão que ainda permite uma alta produtividade agrícola no local. Ao final do estudo verificou-se que a taxa média de perda de solo para todo o estado excedeu o limite de tolerância médio adotado.

Outros estudos no âmbito internacional que utilizaram a Equação Universal de Perda de Solo são Pham, Degener e Kappas (2018), no Vietnã, e Ozcan *et al.* (2008), na Turquia. Há ainda aqueles trabalhos que analisam apenas parte dos fatores integrantes da USLE, como Desmet e Govers (1996), que avaliam apenas o fator topográfico, ou Ilaich *et al.* (2016), que analisam somente a erodibilidade do solo.

Além disso, a Equação Universal de Perda de Solo é muito utilizada para validação de outros métodos de estudo empregados, como no caso de Valladares *et al.* (2012).

Apesar de a USLE ter sido desenvolvida, a princípio, para ser utilizada em locais com pequena ou nenhuma declividade, como áreas agrícolas de relevo suave, ela foi adaptada e aplicada com sucesso em topografias bem mais complexas, sendo utilizada até hoje (DESMET; GOVERS, 1996; MEDEIROS *et al.*, 2016).

Foram ainda realizadas diversas outras adaptações e modificações da Equação Universal de Perda de Solo original, sendo a mais notável e mais utilizada atualmente a RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation –, elaborada por Renard *et al.* (1997). Segundo Lu *et al.* (2004), esta adaptação, ou revisão, ampliou sua aplicação para diferentes situações, não contempladas a princípio na equação original.

Os fatores analisados para a estimativa de perda de solo na RUSLE são os mesmos seis fatores contidos na USLE, a diferença se dá na forma como são utilizados. Apesar de a fórmula principal também ser a mesma utilizada na USLE,

há várias formas de encontrar os valores referentes aos parâmetros considerados (LU *et al.*, 2004). A Tabela 1 mostra alguns desses métodos.

Tabela 1 - Resumo dos principais métodos para obtenção dos parâmetros utilizados na RUSLE

Fator	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
P	Índice Greenness	Ma <i>et al.</i> , 2003
	Dados experimentais	Renard <i>et al.</i> , 1997

Fonte: Lu *et al.* (2004)

A utilização da RUSLE é muito difundida a nível global, especialmente nas áreas mediterrâneas e semi-áridas (GAUBI *et al.*, 2017; TOUBAL *et al.*, 2018).

Entre exemplos de estudos que adotaram esse método estão Vallebona, Mantino e Bonari (2016) na Itália, Du *et al.* (2016) na China, Gaubi *et al.* (2017) na Tunísia, Tadesse *et al.* (2017) na Etiópia, entre diversos outros. Há ainda adaptações da RUSLE, como a RUSLE3D, utilizada por Aiello, Adamo e Canora (2015), formulada para aplicações em terrenos de topografia mais complexa, pois modelos que dão ênfase no terreno e tratam o fator topográfico mais detalhadamente permitem melhores representações de paisagens mais complexas, e, portanto, uma estimativa de perdas de solo mais precisa para essas áreas (TAMENE *et al.*, 2017).

Outro método utilizado para estimar o potencial erosivo de uma área é a Vulnerabilidade Natural à Perda de Solo, desenvolvido por Crepani *et al.* (2001). Esse modelo utiliza-se a princípio de cinco parâmetros fundamentais, que são chamados pelos autores de “temas”, sendo eles: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, e clima. O estudo descreve os métodos para estimar os valores de cada um desses temas com base nas características da área em questão. Em seguida é realizada uma média aritmética com os valores individuais de cada tema, resultando assim no valor final da vulnerabilidade, conforme mostrado na Equação 2.

$$V = \frac{(G+R+S+Vg+C)}{5} \quad (\text{Equação 2})$$

sendo:

- V = Vulnerabilidade natural à perda de solo;
- 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.

O modelo desenvolvido por Crepani *et al.* (2001) estabelece 21 classes de vulnerabilidade à perda de solo, variando de 1 a 3. Nessa escala, valores próximos a 1 correspondem às unidades com maior estabilidade, valores próximos a 2 caracterizam áreas de estabilidade intermediária, e valores próximas a 3 representam as unidades territoriais menos estáveis, ou mais vulneráveis.

Para a estimativa da vulnerabilidade associada à geologia, são levadas em consideração a história da evolução geológica do ambiente de estudo e as informações sobre o grau de coesão das rochas que constituem a área. Enquanto isso, para o cálculo da vulnerabilidade referente à geomorfologia (R) são considerados três fatores, sendo eles o grau de dissecação do relevo pela drenagem (G), a amplitude altimétrica (A), e a declividade (D), conforme Equação 3.

$$R = \frac{(G+A+D)}{3} \quad (\text{Equação 3})$$

O grau de dissecação do relevo pela drenagem diz respeito à quantidade de água absorvida pelo solo e à que fica na superfície do solo, participando do escoamento superficial e aumentando a capacidade erosiva. Assim, a porosidade e a permeabilidade do solo e da rocha estão diretamente relacionadas a esse fator. A amplitude altimétrica, dada pela diferença entre as cotas máxima e mínima contidas na área de estudo, indica a energia potencial disponível para o escoamento superficial, estando relacionada ao aprofundamento da dissecação. Já a declividade, autoexplicativa, é a responsável pela velocidade em que a energia potencial se transforma em cinética, e como aumento da velocidade das massas de água, amplia-se também a capacidade de transporte desse escoamento, aumentando assim o potencial de aparecimento de processos erosivos (CREPANI *et al.*, 2001).

A vulnerabilidade atribuída ao tema “solos”, ou à pedologia do ambiente, nada mais é do que a estimativa da erodibilidade do solo, que é um fator que exprime as características intrínsecas deste, como suas propriedades físicas e químicas, sua composição mineralógica e granulométrica, e as condições externas a que está exposto, como aquelas relacionadas ao manejo do solo. Quanto à vulnerabilidade relacionada à vegetação, o parâmetro utilizado para estima-la é a densidade da cobertura vegetal. Em relação ao clima, o fator levado em consideração para estimar a vulnerabilidade individual desse tema é a erosividade, que está ligada às características físicas da chuva (CREPANI *et al.*, 2001).

Diversos trabalhos brasileiros se utilizam do método de cálculo da vulnerabilidade natural à perda de solo, alguns inclusive adaptando a nomenclatura para Vulnerabilidade Natural à Erosão (LOPES; SALDANHA, 2016), ou ainda somente Vulnerabilidade à Erosão (BARBOSA; LORANDI, 2012; RIBEIRO; CAMPOS, 2007).

Outro recurso muito utilizado na avaliação do potencial de ocorrência de processos erosivos é a análise multicritério. De acordo com Eastman (2005), esse tipo de análise pode ser empregado em diversos tipos de estudos, pois, em resumo, ele se trata de um método de escolha entre as diferentes alternativas existentes, podendo essas alternativas serem das mais diferentes naturezas. As decisões a serem tomadas através de uma análise multicritério podem ser, por exemplo, acerca do melhor local para a instalação de um novo empreendimento, ou quanto à melhor medida a ser tomada para resolver-se um problema. Em ambos os casos citados existem diversas variáveis que podem influenciar na decisão, e a análise multicritério serve exatamente para definir como cada variável será levada em consideração durante o processo.

Segundo Eastman (2005), a avaliação multicritério geralmente pode ser abordada de duas maneiras, sendo a primeira a análise dos critérios a partir da lógica Booleana, definindo assim as chamadas restrições. Essas restrições, como o próprio nome sugere, atuam por exclusão, podendo indicar, por exemplo, se um local é ou não apto, ou se um fenômeno pode ou não ocorrer em um determinado local.

A segunda forma de análise multicritério refere-se aos fatores. Esses fatores podem apresentar diferentes graus de influência na decisão, e, portanto, são geralmente medidos em escala contínua. Um típico exemplo da aplicabilidade desse tipo de critério é a análise da distância até uma rodovia para a instalação de um empreendimento, de forma que quanto mais perto da rodovia, melhor a logística envolvida e, assim, mais apto é o local estudado (EASTMAN, 2005).

No âmbito do estudo de processos erosivos, a análise multicritério é uma ferramenta muito útil, pois diversos fatores influenciam na ocorrência da erosão, mas não necessariamente atuam da mesma forma. Assim, como essa técnica tem o objetivo de exatamente auxiliar na tomada de decisões complexas, ela pode ser utilizada para definir como esses fatores serão ponderados.

Os fatores ou parâmetros iniciais a serem considerados em um estudo podem ser diferentes, devendo ser definidos pelos autores, assim como a forma de análise multicritério, uma vez que existem diversos métodos. Martini *et al.* (2006), por exemplo, com o objetivo de avaliar a suscetibilidade aos processos erosivos e movimentos de massa na área de influência de uma usina hidrelétrica em Santa Catarina, utilizaram três critérios: relevo, solo, e cobertura vegetal. Esses critérios foram então subdivididos em onze fatores que foram associados a partir de uma combinação linear ponderada, com pesos atribuídos por consenso técnico.

Já Ameri, Pourghasemi e Cerda (2018) analisaram diversos fatores morfométricos – definidos como referentes à configuração da superfície do terreno, sua forma, suas dimensões e sua rede de drenagem – a fim de priorizar sub-bacias hidrográficas quanto à suscetibilidade à erosão em relação a uma bacia principal, no Irã. Para tanto foram testados quatro métodos de decisão multicriterial e foram avaliadas suas aplicabilidades no caso em questão. Os modelos utilizados foram SAW (Simple Additive Weighing), VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) e CF (Compound Factor). Após análise e comparação entre os métodos, concluiu-se que o mais adequado para o caso em questão, devido à sua acurácia, foi o método de VIKOR.

Ainda entre as formas de decisão multicritério, um método muito utilizado é o Processo Hierárquico Analítico, conhecido como AHP (acrônimo de Analytic Hierarchy Process). O método AHP, desenvolvido por Saaty (1977), baseia-se na comparação pareada entre as variáveis, e pode servir tanto para a hierarquização de preferências dentro do contexto de um mesmo atributo, quanto para definir as importâncias relativas entre os atributos analisados (EHRLICH, 2004).

Esses atributos ou classes são então comparados par a par, de forma independente, definindo-se a importância relativa de cada alternativa em relação a seu par. O critério de comparação é dividido em cinco níveis, demonstrando: extrema diferença, diferença muito forte, diferença forte, diferença moderada, e igualdade. Essa escala pode ainda ser expressa em valores numéricos, variando de 1 a 9, sendo eles 9, 7, 5, 3, e 1, respectivamente. Valores intermediários podem ainda ser utilizados em caso de dúvida entre duas classificações.

Após a classificação inicial, é montada uma matriz quadrada com os valores atribuídos. Em seguida a matriz é normalizada e os pesos finais de cada parâmetro são distribuídos em uma escala cardinal variando de 0 a 1. Durante esse processo é gerada ainda uma razão de consistência, para determinar a validade e coerência dos pesos. De acordo com Ehrlich (2004), razões de consistência inferiores a 0,1 podem ser tolerados, porém quando maiores do que 0,1 indicam algum problema na distribuição de pesos iniciais e o processo todo deve ser revisado.

Nas áreas de pesquisas ambientais e especialmente em estudos sobre a erosão, o método AHP é extensamente utilizado. Gimenes e Augusto Filho (2013) justificam a utilização desse método citando a redução da subjetividade das análises. Nesse trabalho, os autores propõem a geração de um mapa de fragilidade ambiental para a área ao redor de um trecho de um oleoduto no estado de São Paulo. Para tanto, foram necessários outros mapas intermediários, entre eles o mapa de suscetibilidade à erosão, que foi gerado a partir de quatro parâmetros, sendo eles: declividade, concavidade, uso, e tipos de solo. A ponderação desses fatores foi feita através do método AHP, sendo os pesos relativos atribuídos pelos autores do trabalho. Após o processo, encontrou-se que, para o mapa de suscetibilidade à erosão, o fator analisado mais importante foi a declividade (52%), seguida pelo uso (27%), tipo de solo (14%), e concavidade (7%). Devido à baixa razão de consistência (0,12%), assegurou-se a coerência e confiabilidade dos resultados.

Rahman, Shi e Chongfa (2009) também se utilizam do método AHP para a avaliação do risco de erosão em uma província da China, utilizando nesse caso nove fatores, incluindo alguns parâmetros pouco vistos em outros estudos, como a profundidade do solo e a população local.

Pode-se ainda citar Silva *et al.* (2016), que analisaram a suscetibilidade à erosão em uma sub-bacia no Estado de Minas Gerais. Nesse trabalho foram analisados os parâmetros declividade, precipitação, pedologia, e uso do solo, e a ponderação também foi feita através do método AHP, gerando uma razão de consistência de 0,438. Concluiu-se no estudo que os locais com mais alta suscetibilidade à erosão foram aqueles sujeitos à elevadas declividades e embasamento geológico propício ao aparecimento de processos erosivos.

Por fim, há ainda trabalhos que se utilizam do método AHP juntamente com outras metodologias de estudo de processos erosivos, como é o caso de Oliveira *et al.* (2009), que aplicam o processo analítico hierárquico ao modelo de Vulnerabilidade Natural à Erosão, desenvolvido por Crepani *et al.* (2001), já discutido anteriormente. Neste trabalho os autores estimaram os valores individuais de vulnerabilidade para cada tema (geologia, geomorfologia, pedologia e vegetação), e aplicaram então o AHP para hierarquizar as variáveis envolvidas. É importante notar que para compatibilizar os dois métodos a classificação de vulnerabilidade foi convertida em uma escala de 0 a 1 através de lógica fuzzy, utilizando uma função sigmoïdal crescente.

Além disso, existem ainda os modelos físicos – muitas vezes chamados também de computacionais – utilizados para o estudo de processos erosivos, como já mencionado anteriormente. Entre eles está o LISEM, ou Limburg Soil Erosion Model, que é um modelo físico tanto hidrológico quanto de erosão do solo. Esse modelo simula o escoamento e o transporte de sedimentos em bacias, causados por eventos individuais de precipitação. Entre os parâmetros considerados no LISEM estão pluviosidade, interceptação, armazenamento superficial em micro depressões, infiltração, movimento vertical da água no solo, escoamento superficial, escoamento em canais, desprendimento de partículas devido ao salpicamento, desprendimento de partículas devido ao escoamento superficial, e capacidade de transporte do fluxo (DE ROO *et al.*, 1996).

As aplicações do modelo de LISEM podem ser observadas em vários países ao redor do mundo. Chaplot *et al.* (2005) estudaram as condições hidrológicas de uma bacia hidrográfica no Laos e, como consequência, modelaram o desenvolvimento da erosão em sulcos na bacia. Gomes *et al.* (2008) aplicaram o modelo a uma bacia hidrográfica brasileira, no estado de Minas Gerais, com o objetivo de calibrar o modelo para o contexto da área de estudo, estudar a influência dos diversos cenários nas variáveis hidrológicas, e avaliar o método de LISEM, identificando ainda os usos e ocupações que mais impactam os recursos da bacia. O trabalho alcançou seus objetivos, concluindo que o modelo de LISEM apresentou resultados satisfatórios nas simulações hidrológicas executadas, podendo assim ser aplicado no estudo de outras bacias hidrográficas tropicais. Já Starkloff e Solte (2014), na Noruega, avaliaram o comportamento do método de LISEM em comparação a outro método físico

denominado EROSION 3D, cuja principal diferença é a forma como este modelo calcula a infiltração, o escoamento superficial e o desprendimento e deposição de partículas. Entre outros resultados, este estudo mostrou que o EROSION 3D requer menos tempo de coleta de dados, devido à menor quantidade de dados de entrada, sendo assim uma boa ferramenta de planejamento, enquanto o LISEM é uma melhor opção para um estudo mais aprofundado dos processos hidrológicos na bacia.

Entre os modelos físicos, há ainda aqueles que estudam os processos erosivos com principal enfoque na geração e transporte de sedimentos. Esses métodos normalmente estudam o escoamento superficial e a dinâmica envolvida no transporte dos resíduos, gerando, assim, resultados e estimativas importantes para o estudo tanto de processos erosivos quanto da sedimentação.

O método de WEPP (Water Erosion Prediction Project) é um modelo computacional, ou físico, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) desde 1985 para prever e estimar o aparecimento e desenvolvimento de erosões hídricas. Esse modelo baseia-se dos conceitos de infiltração, escoamento superficial, crescimento vegetal, decomposição de resíduos, hidráulica, lavoura, manejo, consolidação do solo, e mecânica da erosão. Para prever o surgimento de processos erosivos em sulcos e entre-sulcos, o modelo se utiliza de uma equação de continuidade de sedimentos em estado estacionário. Além disso, é partido do princípio de que o destacamento de solo acontece quando a força de cisalhamento do escoamento é maior do que aquela suportada pelo solo, e a quantidade de resíduos é menor do que a capacidade de transporte do fluxo, enquanto isso, a deposição se dá quando a carga de sedimentos no fluxo é maior do que sua capacidade de transporte. Esse modelo foi projetado para poder estimar as distribuições espaciais da perda de solo, assim como lidar com a variabilidade espacial da topografia, rugosidade da superfície, propriedades do solo, hidrologia, e uso do solo (NEARING *et al.*, 1989).

Entre os trabalhos que aplicaram o método de WEPP no Brasil estão Lier *et al.* (2005) e Anache *et al.* (2018). Já no âmbito internacional há o trabalho de Mahmoodabadi e Cerda (2013), que estudaram a aplicação do método no clima semiárido do Irã, Brooks *et al.* (2016), nos Estados Unidos, Defersha, Melesse e McClain (2012) no Quênia, Shen *et al.* (2010) na China, entre outros.

Outro modelo físico também baseado no conceito da produção e transporte de sedimentos é o SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Esse modelo hidrosedimentológico também foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), porém para simular processos hidrológicos e rastrear a transferência de sedimentos e poluentes para a rede de drenagem, tendo sido muito utilizado para avaliar os efeitos do uso e manejo do solo nos processos hidrológicos, transporte de sedimentos e qualidade da água (UZEIKA *et al.*, 2012).

Apesar desse modelo não ter sido desenvolvido especificamente para avaliar a ocorrência de processos erosivos, por ele conter em sua metodologia uma estimativa da geração de sedimentos, o que significa, de modo geral, a desagregação de partículas decorrida de processos erosivos, ele é muito utilizado em estudos desse tipo. Podem-se citar trabalhos de diversos países que se utilizaram do modelo SWAT, como Halecki, Kruk e Ryczek (2018), na Polônia, Zhang *et al.* (2017), na China, Ghafari *et al.* (2017), no Irã, Furl, Sharif e Jeong (2015), nos Estados Unidos, entre outros.

Além dos modelos já citados, existem ainda diversos outros métodos físicos ou computacionais que podem ser aplicados aos estudos de processos erosivos. Pandey *et al.* (2016) fazem uma revisão detalhada de cinquenta métodos, sendo uma fonte interessante para trabalhos que planejam utilizar metodologias de estudo como estas.

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Enquanto os modelos físicos foram desenvolvidos especialmente para serem utilizados em ambientes computacionais (sendo inclusive utilizado o termo “modelos computacionais” ou, em inglês, “computer-based systems”), muitos dos métodos empíricos a princípio foram elaborados sem qualquer dependência de softwares, baseando-se em cálculos manuais.

De acordo com Desmet e Govers (1996), diversos estudos utilizaram métodos manuais para o cálculo dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo em bacias hidrográficas desde o seu surgimento. Eram calculados os valores de cada critério para uma amostra de pontos e esses valores eram considerados representativos para toda a área. Em resumo, o resultado final era

obtido através de uma amostragem, e a quantidade de pontos considerados e dados coletados eram diretamente relacionados ao tempo necessário para concluir essas tarefas.

Diante disso, tendo em vista o problema do grande tempo consumido durante os cálculos utilizando ferramentas manuais, e também visando à melhora da precisão dos valores obtidos, começaram-se a ser incorporados Sistemas de Informações Geográficas aos métodos de cálculo de perda de solo e potencial de erosão de forma geral.

Os Sistemas de Informações Geográficas – ou SIGs – são, em resumo, softwares e ferramentas de análise de dados espaciais e temporais. Esses sistemas podem capturar, armazenar, manipular, analisar e apresentar dados georreferenciados, sendo utilizados nas mais diversas áreas do conhecimento, para diferentes razões e de várias formas (ARONOFF, 1989; BURROUGH, 1986).

Entre as utilidades dos SIGs estão o planejamento urbano, estudos sobre as mudanças climáticas, definição do melhor local para instalação de um determinado estabelecimento, determinação de áreas de risco para contração de doenças, estudo da área afetada pelo derramamento de poluentes, escolha da melhor rota para um determinado serviço, planejamento de estratégias militares, entre muitos outros.

Em um ambiente de SIG, um banco de dados georreferenciado pode ser gerenciado e analisado a partir de diferentes layers que trabalham características e parâmetros específicos, de forma que pode ser estudada a influência específica de cada um desses parâmetros no contexto geral ou ainda a relação entre cada um desses fatores.

Segundo Couclelis (2005), geralmente as aplicações mais úteis do SIG referem-se a interações complexas entre entidades geográficas relativamente estáticas e fenômenos dinâmicos, através dos quais essas entidades se desenvolvem. Este é, precisamente, o caso do estudo de processos erosivos e dos fatores que influenciam sua ocorrência.

Os Sistemas de Informações Geográficas são tão importantes aos estudos relacionados ao potencial de ocorrência de erosão, e foram tão bem incorporados a esse tipo de estudo que, atualmente, praticamente todos os trabalhos referentes ao tema se utilizam de softwares e ferramentas desse tipo.

A maioria dos estudos utilizados como referência para os métodos de pesquisa existentes neste trabalho, por exemplo, foram realizados com o auxílio de um SIG. Há ainda, inclusive, muitos estudos cujo foco é demonstrar a importância desse recurso para pesquisas do gênero. O Quadro 1 mostra alguns dos trabalhos que utilizam o SIG no contexto do estudo de processos erosivos.

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (continua)

Autores, país e software	Método utilizado	Assunto	Considerações pertinentes
Desmet e Govers (1996) Bélgica IDRISI	USLE e RUSLE	Uso do SIG para calcular o fator LS em área de topografia complexa	Apesar de ambos os métodos automatizado e manual apresentarem resultados semelhantes, o método automatizado tem vantagens quanto ao tempo de execução e objetividade.
Fujaco, Leite e Neves (2016) Brasil ArcGIS	USLE	Desenvolvimento de ferramentas de SIG para determinação da perda de solo sub-bacias agrárias	O SIG se mostrou eficaz no estudo. O script desenvolvido permitiu identificar e caracterizar a perda de solo de maneira rápida, eficaz e robusta, com um tempo médio de processamento inferior a um segundo por km ² . A modelagem através do SIG possibilita uma visão geral do sistema, permitindo fácil acesso à informação pelo público e a geração de políticas de conservação nas unidades em estudo.
Graça <i>et al.</i> (2015) Brasil SAGA GIS ArcGIS	USLE	Análise multitemporal da perda de solo utilizando SIG	A análise forneceu uma boa resposta em relação ao levantamento e cruzamento de dados no ambiente de SIG, embora os resultados multitemporais de perda de solo para a bacia não tenham conseguido demonstrar variações significativas que fortaleceriam este tipo específico de análise.

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (continuação)

Autores, país e software	Método utilizado	Assunto	Considerações pertinentes
Ozcan <i>et al.</i> (2008) Turquia ArcView	USLE	Avaliação do risco de erosão em diferentes áreas a partir da USLE integrada ao SIG e à geoestatística	O fator uso/cobertura do solo teve maior influência do que os fatores topográficos na estimativa da perda de solo. Além disso, lavouras e pastagens demonstraram-se mais suscetíveis à erosão do que florestas, plantações e áreas recreativas.
Barbosa <i>et al.</i> (2015) Brasil QGIS, gvSIG e LS-TOOLS	USLE	Aplicação da USLE em softwares de SIG livres e gratuitos	A utilização dos softwares livres e gratuitos foi satisfatória aos propósitos do trabalho, mostrando-se ferramentas completas e com grande potencial, devido à facilidade de visualização e integração dos dados, rapidez de execução dos resultados, acesso facilitado e download disponível gratuitamente a todos os usuários. Destaca-se ainda o uso desses softwares para suprir as carências relacionadas ao acesso à informação para a compreensão de impactos gerados ao meio ambiente e o consequente planejamento de ações compensatórias e mitigadoras, como em municípios com receita orçamentária limitada.
Medeiros <i>et al.</i> (2016) Brasil ArcGIS	USLE	Aplicação da USLE para estimar taxas de perda de solo para todo o estado de São Paulo, usando dados com resolução de 30 m e o auxílio do SIG	Muitas áreas do estado apresentam altos níveis (críticos) de degradação do solo devido ao predomínio de atividades humanas consolidadas, especialmente no cultivo de cana-de-açúcar e pastagem. A maioria dos solos obteve estimativas acima do limite de tolerância.

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (continuação)

Autores, país e software	Método utilizado	Assunto	Considerações pertinentes
Noori <i>et al.</i> (2016) Iran ArcGIS	MPSIAC e EPM	Avaliação da eficiência dos métodos para estimativa da produção de sedimentos e intensidade da erosão a curto e longo prazos, utilizando sensoriamento remoto e SIG	Quase metade da área de estudo é altamente suscetível à erosão devido às formações geológicas e à cobertura do solo. A curto prazo ambos os métodos foram eficientes, enquanto a longo prazo o método EPM demonstrou-se superior ao MPSIAC
Oliveira <i>et al.</i> (2015) Brasil ArcGIS	USLE	Desenvolvimento de uma estrutura de SIG para calcular automaticamente a perda de solo através da USLE	A estrutura desenvolvida (GISus-M) provou-se eficiente na integração de métodos de cálculo dos fatores da USLE com um sistema de geoprocessamento, fornecendo ferramentas para o cálculo dos fatores LS e C de diferentes modos
Pham, Degener e Kappas (2018) Vietnã ArcGIS	USLE	Integra a USLE ao SIG para a estimativa da perda de solo	Comprovou a eficiência da combinação entre a USLE e o SIG, e verificou que o fator de maior influência na estimativa da taxa de erosão foi o fator topográfico (LS), seguido por P, K, C e R.
Nekhay <i>et al.</i> (2009) Espanha ArcGis MATLAB	ANP (Analytic Network Process), USLE e RUSLE	Estimativa do risco de erosão utilizando o ANP e o SIG, comparando o resultado com aquele obtido através da RUSLE	Um ponto chave do estudo foi o fato de o método proposto ser de natureza híbrida, combinando dados amostrais com avaliação de especialistas, além de integrar a USLE/RUSLE com um método multicritério, e ainda considerar um fator não usual, que é a proximidade a cursos d'água.
Sotiropoulou <i>et al.</i> (2011) Grécia ArcGIS	USLE	Desenvolvimento de um modelo de SIG com interface amigável para estimar o risco de erosão através da USLE	A principal vantagem de utilizar o modelo desenvolvido foi a automatização do processo de análise espacial. O modelo é fácil de modificar, compartilhar e reutilizar para outras áreas.

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (continuação)

Autores, país e software	Método utilizado	Assunto	Considerações pertinentes
Silva <i>et al.</i> (2016) Brasil ArcGIS	AHP	Identificar áreas suscetíveis à erosão com o auxílio do método AHP e do SIG	Os locais que apresentaram alta suscetibilidade à erosão são apresentadas elevadas declividades e embasamento geológico propício ao seu surgimento, destacando-se o fator declividade. O estudo comprovou o grande potencial do SIG na integração de dados geocodificados, além da elevada precisão do produto final e da economia de tempo em relação aos métodos tradicionais de análise.
Silva e Luchiari (2016) Brasil Spring	USLE	Estimativa da perda de solo por erosão laminar através da USLE aliada ao SIG	Foi possível estimar as áreas de maior vulnerabilidade à erosão, mapear feições lineares erosivas, e apontar qual uso é mais responsável por grandes perdas de solos. Destacou-se que o modelo só prediz erosão laminar, excluindo formas de erosão mais avançadas.
Ameri, Pourghase e Cerda (2018) Irã ArcGIS	Análises multicritério: TOPSIS, VIKOR, SAW, e CF	Comparação entre diferentes modelos multicritério para tomada de decisão em relação à priorização de sub-bacias quanto à sua erodibilidade	O estudo mostrou que as técnicas de SIG e sensoriamento remoto em combinação com métodos multicritério como TOPSIS, SAW, VIKOR e CF podem ser usadas para tomadas de decisão e planejamento de recursos hídricos e do solo no controle da erosão.
Alexakis, Hadjimitsis e Agapiou (2013) Chipre ArcGIS	RUSLE e AHP	Uso integrado de dados de sensoriamento remoto, SIG e precipitação para a avaliação da taxa de erosão do solo	Utilizando a metodologia AHP foi possível superar uma das principais restrições do método RUSLE, que era a sua incapacidade de considerar as interdependências entre os diferentes fatores.

Quadro 1 - Trabalhos relacionados ao estudo de processos erosivos utilizando SIG (conclusão)

Autores, país e software	Método utilizado	Assunto	Considerações pertinentes
Gimenes e Augusto Filho (2013) Brasil ArcGIS	AHP	Desenvolvimento de mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de AHP e SIG	O mapa mostrou-se coerente com o esperado. Foi incluída uma análise específica quanto aos fatores bióticos e socioeconômicos, caracterizados pelo uso do solo. Notou-se a importância da seleção dos atributos.
Barbosa e Lorandi (2012) Brasil SPRING E ArcGIS	VNE	Estudo da vulnerabilidade à erosão com auxílio de geoprocessamento	Os resultados alcançados mostraram que as técnicas de geoprocessamento são muito eficientes no planejamento ambiental.
Halecki, Kruk e Ryczek (2018) Polônia ArcSWAT 2012.10_2.13 interface of ArcGIS 10.3.1	SWAT	Modelagem de opções relevantes de gerenciamento em áreas agricultáveis e estimativa de perda de solo utilizando dados espaciais	Foram simulados diferentes cenários de gerenciamento em áreas agricultáveis e suas respectivas perdas de solo resultantes da erosão hídrica, o que revelou, entre outros, o benefício da pastagem sobre outros tipos de culturas.
Oliveira <i>et al.</i> (2009) Brasil SPRING	VNE e AHP	Aplicação do método AHP na obtenção da Vulnerabilidade Natural à Erosão, com auxílio do SIG	A utilização do método AHP mostrou-se adequada, diminuindo a subjetividade na determinação de pesos relativos e a possibilidade de analisar o grau de coerência adotado, o que resultou na classificação de maior percentual da área em maiores níveis de vulnerabilidade quando comparado ao método original de Crepani.

Fonte: organizado pela autora

2.3 BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE ESTUDO

O conceito de bacia hidrográfica já foi definido e discutido por muitos autores ao longo dos anos, alguns considerando aspectos mais específicos, outros sendo mais abrangentes. De acordo com Botelho (1999), a bacia

hidrográfica, ou bacia de drenagem, pode ser entendida como uma área da superfície terrestre limitada por divisores de água e drenada por um rio principal e seus tributários. Coelho Netto (1998) define ainda a bacia hidrográfica como uma área em que a drenagem da água, sedimentos e materiais dissolvidos se encaminha para um ponto em comum de um canal fluvial, que é a saída da bacia.

Devido às características das bacias hidrográficas, especialmente do ponto de vista sistêmico, elas se tornaram naturalmente uma popular unidade de estudo em todo o tipo de trabalho envolvendo a análise da superfície terrestre.

Segundo Porto e Porto (2008), desde o início dos anos 1990 o recorte territorial das bacias hidrográficas vem sendo utilizado para a gestão de recursos hídricos. Isso porque, para que esta gestão seja efetiva, é preciso considerar todos os aspectos envolvidos no ambiente, incluindo os físicos, sociais e ambientais, e a área definida por uma bacia permite um foco adequado para esse objetivo. A Política Nacional de Recursos Hídricos, datada de 1997, adotou a bacia hidrográfica como unidade de estudo e gestão.

Além disso, dentro de uma mesma bacia é possível identificar as relações existentes entre os elementos que compõem e atuam na paisagem, assim como os processos responsáveis pelas modificações a que são expostas. Outra vantagem da bacia hidrográfica é o fato de sua delimitação ser mais precisa em relação a outros tipos de unidade de planejamento, como aquelas definidas por atributos climáticos ou tipos de vegetação. Enquanto isso, em relação a outras unidades com limites também bem demarcados, como unidades político-administrativas ou linhas de coordenadas cartográficas, a bacia leva vantagem por ser um ambiente mais uniforme e contínuo se comparado a esses outros traçados (BOTELHO, 1999).

Dentro de uma bacia hidrográfica existem ainda outras bacias menores, denominadas sub-bacias, ou ainda microbacias. Não há um consenso entre os autores quanto à definição exata de microbacias, pois apesar de o termo estar a princípio associado a uma noção de dimensão, não existem tamanhos estipulados para esse tipo de unidade territorial. Há, porém, uma definição instituída pelo Programa Nacional de Microbacia Hidrográfica (PNMH), do ano de 1987, segundo o qual uma microbacia é “uma área drenada por um curso d’água e seus afluentes, a montante de uma determinada seção transversal,

para a qual convergem as águas que drenam a área considerada” (BOTELHO, 1999).

Observa-se que a conceituação de microbacia introduzida pelo Programa Nacional de Microbacia Hidrográfica não apresenta grandes diferenças em relação às definições de bacia hidrográfica existentes na literatura. Assim, com o intuito de facilitar o entendimento acerca da identificação das unidades que compõem o sistema hidrográfico, bem como sua própria dinâmica, Bertoni e Lombardi Neto (1999) caracterizam a microbacia hidrográfica como uma “unidade espacial mínima”, a qual se chega após a decomposição de uma bacia hidrográfica em unidades menores até atingir a menor unidade possível. No entanto, essa classificação, em alguns casos, poderia corresponder a canais efêmeros ou cabeceiras de drenagem, de acordo com Botelho (1999), não sendo, dessa forma, ideal para todas as situações.

Dessa forma, apesar de haver estudos sugerindo possíveis dimensões de trabalho ideais para bacias, fica a cargo do pesquisador definir a forma de nomear sua bacia de estudo, utilizando os termos bacia, sub-bacia ou microbacia hidrográfica. Botelho (1999) acrescenta ainda que a microbacia de estudo deve ocupar uma área grande o suficiente para que seja possível identificar as inter-relações entre os elementos que a compõem, e suficientemente pequena para ser compatível com os recursos disponíveis para o estudo.

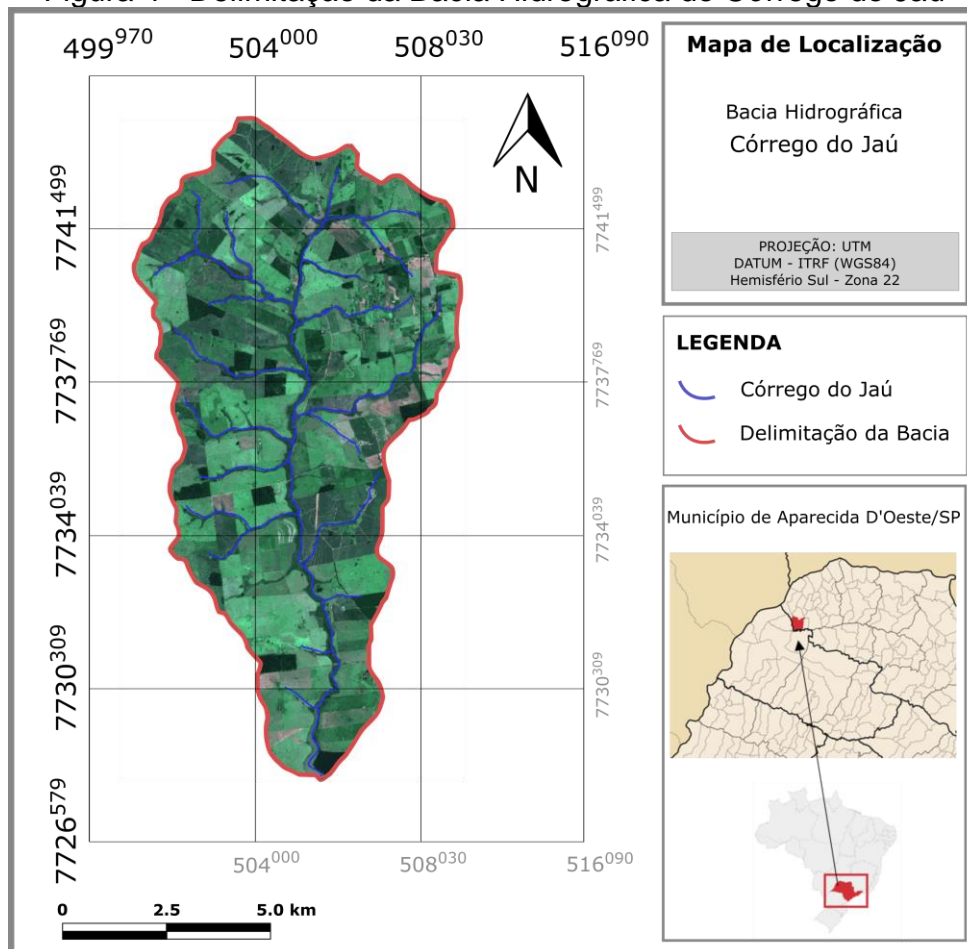
2.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como área de estudo a bacia hidrográfica do Córrego do Jaú, situada na região noroeste do Estado de São Paulo, dentro dos limites do município de Aparecida D'Oeste.

A microbacia do Córrego do Jaú pertence à Bacia Hidrográfica do Rio São José dos Dourados (sub-bacia Baixo São José dos Dourados), que é a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos nº 18, ou UGRHI 18, e cujas principais atividades econômicas são práticas agrícolas diversificadas e pecuária extensiva (CBH-SJD, 2017). Destacam-se na microbacia de estudo o cultivo da cana-de-açúcar e frutas cítricas, além da pecuária.

A bacia do córrego do Jaú possui aproximadamente 82,64 km², estando compreendida entre as coordenadas geográficas 20°34'42" S - 50°59'58" O e 20°23'11" S - 50°49'33" O, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Delimitação da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



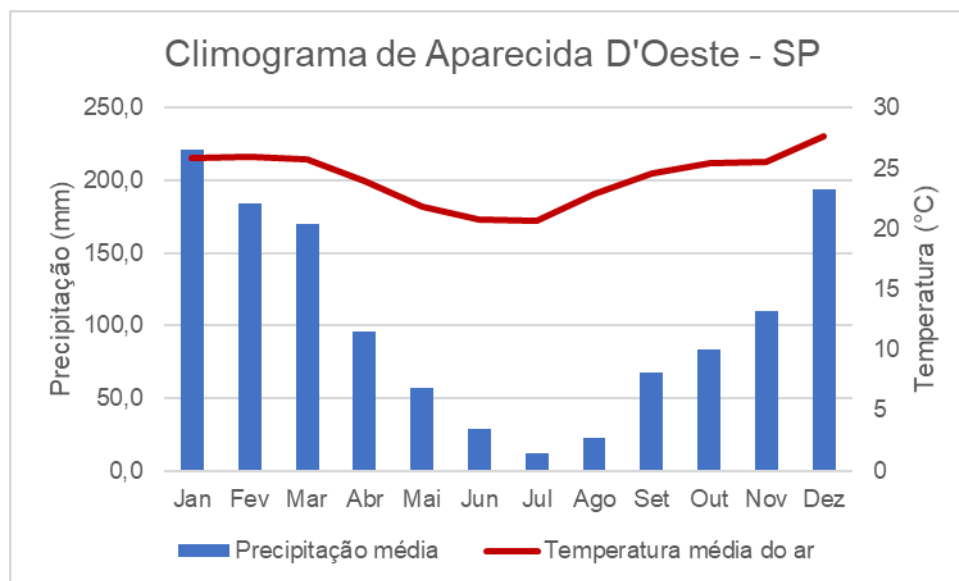
Fonte: autoria própria

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018a), a cidade de Aparecida D'Oeste possui 4.329 habitantes, com mais de 80% da população localizada na área urbana.

A principal produção agrícola do município em termos de área é a cana-de-açúcar, seguida pelo plantio de banana, um tipo de lavoura permanente, além do cultivo de citros (principalmente laranja) e outras culturas menos expressivas. O clima da região é tropical com estação seca de inverno e verão chuvoso (Aw, de acordo com a classificação de Köppen), e a precipitação anual média para o município é de 1247,7 mm/ano, de acordo com o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – CEPAGRI (2018), sendo

a distribuição média das chuvas dadas conforme o climograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Climograma do município de Aparecida D'Oeste – SP



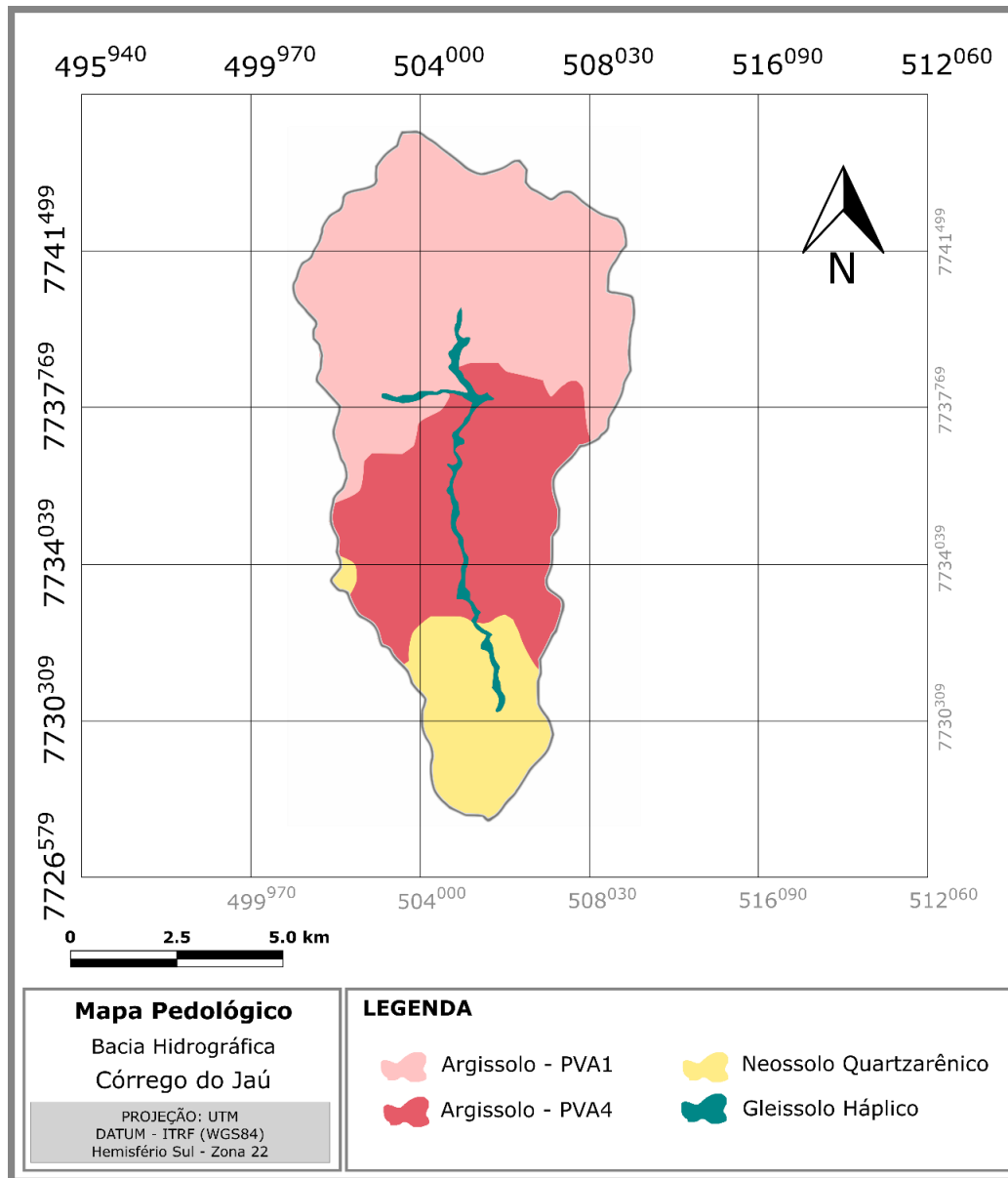
Fonte: CEPAGRI (2018)

De acordo com o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017), a bacia de estudo é composta Argissolos Vermelho-Amarelos, Neossolos, e Gleissolos, conforme mostrado na Figura 6. Observa-se que os Argissolos são divididos em dois grupos. Na parte superior da bacia encontra-se o solo tipo PVA1, um Argissolo Vermelho-Amarelo ou Vermelho Eutrófico arênico ou abrupto A moderado ou fraco, de textura arenosa/média, que compõe aproximadamente 50% da área de estudo. O segundo tipo de Argissolo presente no local trata-se do tipo PVA4, uma associação de Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico A moderado, com um Argissolo Vermelho Distrófico e Eutrófico típico, ambos de textura arenosa/média e média, compondo cerca de 32% da área da bacia. Já o Neossolo Quartzarênico e o Gleissolo Háptico são responsáveis por, respectivamente, 15% e 2% da área de estudo, aproximadamente.

A litologia da bacia do Córrego do Jaú, segundo mapa disponibilizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2006), é composta por arenitos quartzosos da Formação Santo Anastácio (K2vp), do Grupo Caiuá, e arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe (K2sa), do Grupo Bauru, na

proporção de 38% e 62%, respectivamente, conforme pode ser observada na Figura 7.

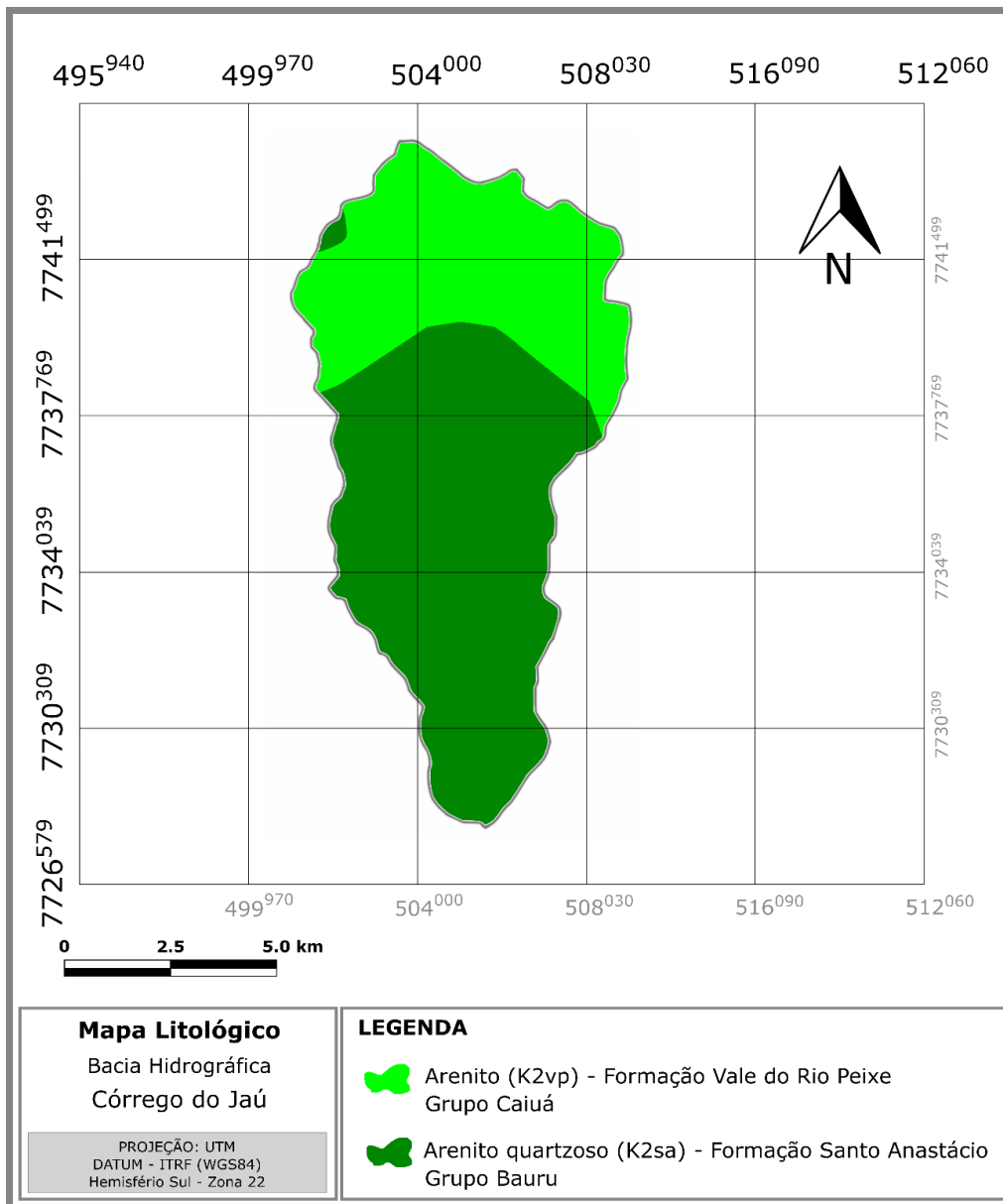
Figura 6 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: adaptado de Rossi (2017)

Quanto à ocupação da microbacia de estudo, esta é majoritariamente rural, havendo expressivas áreas de cultivo de cana-de-açúcar e pecuária extensiva. Além disso, a região conta ainda com um conhecido problema de erosão, o que motivou o presente estudo.

Figura 7 - Mapa litológico da Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: adaptado de CPRM (2006)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

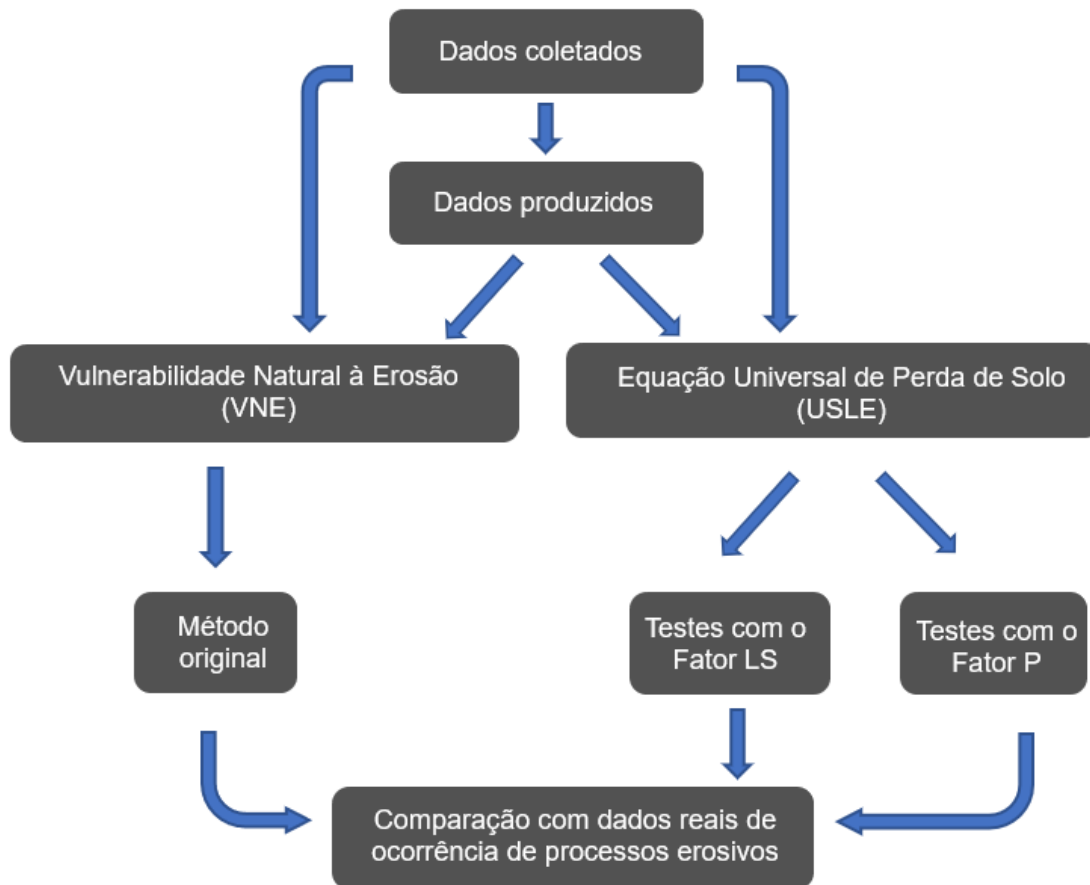
Para a estimativa do potencial de ocorrência de erosão na área de estudo foram necessários dados detalhados sobre o local, os quais foram trabalhados em softwares específicos. Dessa forma, os materiais utilizados são listados a seguir:

- 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, 2018b), na qual foram extraídos os dados de hipsometria e hidrografia;
- Imagens de satélite Sentinel-2 datadas de 22/02/2018, nas bandas 02, 03, 04 e 08, com resolução de 10 metros (DRUSCH *et al.*, 2012);
- Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017), na escala 1:250.000, obtido através do site DataGEO (OHATA, 2015);
- Mapa Litológico do Estado de São Paulo obtido através do sistema de geociências do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006);
- Mapas de Modelo Digital de Elevação na escala 1:250.000 para a folha 20S51, obtida através do Projeto Topodata (VALERIANO, 2008);
- Dados de pluviosidade (CEPAGRI, 2018);
- Dados amostrais retirados do Levantamento Taxonômico de Solos conduzido pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos (DEFERS) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP em 41 propriedades rurais em ambientes de produção de cana-de-açúcar e áreas de pastagens pertencentes à Usina Vale do Paraná S/A (ALVES *et al.*, 2009);
- Imagens de satélite do software Google Earth® para identificação de processos erosivos por análise visual;
- Fotos da área de estudo obtidas através de levantamento de campo;
- Software netErosividade SP (MOREIRA *et al.*, 2006);
- Software SAGA GIS – Source Forge (CONRAD *et al.*, 2015);
- Software SPRING versão 5.5.1 (CAMARA *et al.*, 1996).

3.2 METODOLOGIAS

Foram utilizadas duas diferentes metodologias para investigar o potencial erosivo na Bacia do Córrego do Jaú, e os resultados foram então comparados com dados reais de feições erosivas identificadas na área de estudo, conforme organograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Organograma do estudo do potencial de ocorrência de processos erosivos na bacia hidrográfica de estudo



Fonte: autoria própria

3.2.1 – Cálculo da Vulnerabilidade Natural à Erosão (VNE)


O primeiro método escolhido para estimar o potencial de ocorrência de processos erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú foi o método da Vulnerabilidade Natural à Erosão, proposto por Crepani *et al.* (2001). Segundo os autores, essa metodologia foi desenvolvida com base no conceito de Ecodinâmica, de Tricart (1977), tendo em vista ainda o potencial para estudos que se utilizem de imagens de satélite. Esse método foi escolhido por ser relativamente simples, sendo possível executá-lo apenas com dados gratuitos obtidos facilmente em bancos de dados de acesso público, além de ser um método brasileiro, já testado em diversos outros locais do país.

De acordo com Crepani *et al.* (2001) para a utilização desta metodologia são necessários os mapas temáticos de geologia, geomorfologia, solos, e vegetação, além de dados históricos de pluviometria. São construídos então

Planos de Informação (PI) em um SIG com cada um dos mapas e a análise e reinterpretação das informações temáticas são feitas por meio de edição vetorial.

A vulnerabilidade de cada área é definida a partir de seu estágio de evolução morfodinâmica, sendo estabelecidas vinte e uma unidade de paisagem divididas entre cinco graus de vulnerabilidade. Essas unidades de paisagem variam entre situações estáveis, onde prevalecem os processos de pedogênese (sendo atribuídos valores de vulnerabilidade próximos a 1,0), passando por situações intermediárias, onde há um equilíbrio entre os processos (atribuindo-se valores próximos a 2,0), até situações instáveis, nas quais há um predomínio dos processos de morfogênese (sendo atribuídos valores de vulnerabilidade próximos a 3,0). Assim, a vulnerabilidade é inversamente proporcional à estabilidade. A Tabela 2 mostra a escala de vulnerabilidade utilizada.

Tabela 2 - 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		
U6	2,5	MODERADAMENTE VULNERÁVEL	
U7	2,4		
U8	2,3		
U9	2,2	INTERMEDIÁRIO	
U10	2,1		
U11	2,0		
U12	1,9		
U13	1,8		
U14	1,7	MODERADAMENTE ESTÁVEL	
U15	1,6		
U16	1,5		
U17	1,4		
U18	1,3	ESTÁVEL	
U19	1,2		
U20	1,1		
U21	1,0		

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

Segundo Crepani *et al.* (2001), a aplicação do modelo deve ser feita inicialmente para cada um dos temas de forma individual, de modo que a cada um é atribuído um valor variando de 1,0 a 3,0. Em seguida, é realizada uma

média aritmética entre esses valores para gerar então a vulnerabilidade natural à perda de solo, conforme Equação 2 (página 33).

3.2.1.1 Geologia (G)

O fator Geologia consiste em informações referentes à história da evolução geológica do ambiente e ao grau de coesão das rochas que compõem esse ambiente. A Tabela 3 apresenta os valores de vulnerabilidade aplicados às diferentes classes de rocha consideradas.

Tabela 3 – Escala de vulnerabilidade para diferentes tipos de rochas

Rocha	Vulnerabilidade
Quartzitos ou Metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzito Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzito muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9
Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	2,0
Filito, Metassilito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Arcózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

Os tipos de rochas existentes na área de estudo e sua distribuição são mostrados no mapa litológico apresentado na Figura 7, durante a caracterização

da área de estudo, conforme dados extraídos do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006).

Apesar de as duas formações litológicas serem compostas majoritariamente por arenitos, elas não são iguais. A formação localizada na parte superior da bacia trata-se da Formação Vale do Rio do Peixe (K2vp), Grupo Bauru, composta por arenito muito fino a fino marrom, rosa e alaranjado, seleção boa; camadas tubulares de siltito maciço, cor creme a marrom, e lentes de arenito conglomerático, com intradastos argilosos ou carbonáticos; ambiente continental desértico, eólico. Já na parte inferior na bacia localiza-se a Formação Santo Anastácio (K2sa), Grupo Caiuá, composta por arenito quartzoso, fino a muito fino, seleção pobre e pouca matriz siltico-argilosa; arenito conglomerático com lentes de conglomerado e arenito; ambiente continental desértico, planície de borda de mares de areia.

Devido à composição mais grosseira da Formação Santo Anastácio é possível considerar que esta é ligeiramente mais vulnerável do que a Formação Vale do Rio do Peixe, portanto foi realizada uma diferenciação de vulnerabilidade dentro da classe de arenitos atribuída por Crepani *et al.* (2001), assim, a vulnerabilidade para o fator geologia foi atribuída de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Escala de vulnerabilidade para os tipos de rochas existentes na área de estudo

Rocha	Vulnerabilidade
Arenitos quartzosos – K2sa (Formação Santo Anastácio)	2,45
Arenitos – K2vp (Formação Vale do Rio do Peixe)	2,4

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

3.2.1.2 Geomorfologia (R)

O critério Geomorfologia é composto de três fatores, sendo eles o grau de dissecação do relevo pela drenagem (G), a amplitude altimétrica (A), e a declividade (D), conforme Equação 3 (página 34).

O grau ou intensidade de dissecação do relevo – diretamente relacionado à porosidade e permeabilidade do solo e da rocha – é também conhecido como amplitude interfluvial, sendo calculado a partir da distância entre canais de

drenagem. Quanto maior for o interflúvio, menor é a intensidade de dissecação e, portanto, menor a vulnerabilidade do local. Devido à complexidade do cálculo desse fator, foi utilizado um método simplificado descrito por Scotto (2012).

A princípio a bacia de estudo foi dividida em quatro unidades geomorfológicas. O critério de divisão, manual, teve como base a configuração do sistema de drenagem, que possui duas porções com uma estruturação próxima à retangular ou em treliça, onde os tributários se interligam ao curso principal através de ângulos aproximadamente retos, e duas porções com padrão mais semelhante ao dendrítico, no qual os tributários confluem em ângulos agudos, formando diversas ramificações (FONTES, 2010).

Em seguida foram realizadas medidas de distância entre interflúvios dentro de cada uma dessas unidades a partir da ferramenta “Operações Métricas”, do software SPRING, e foi gerada uma média de distâncias interfluviais para cada unidade.

Com base nesses dados e nos valores atribuídos por Crepani *et al.* (2001) para cada faixa de amplitude interfluvial (como observado na Tabela 5), foi elaborado um mapa temático com a vulnerabilidade correspondente ao grau de dissecação do relevo para cada unidade geomorfológica, conforme mostrado na Figura 9.

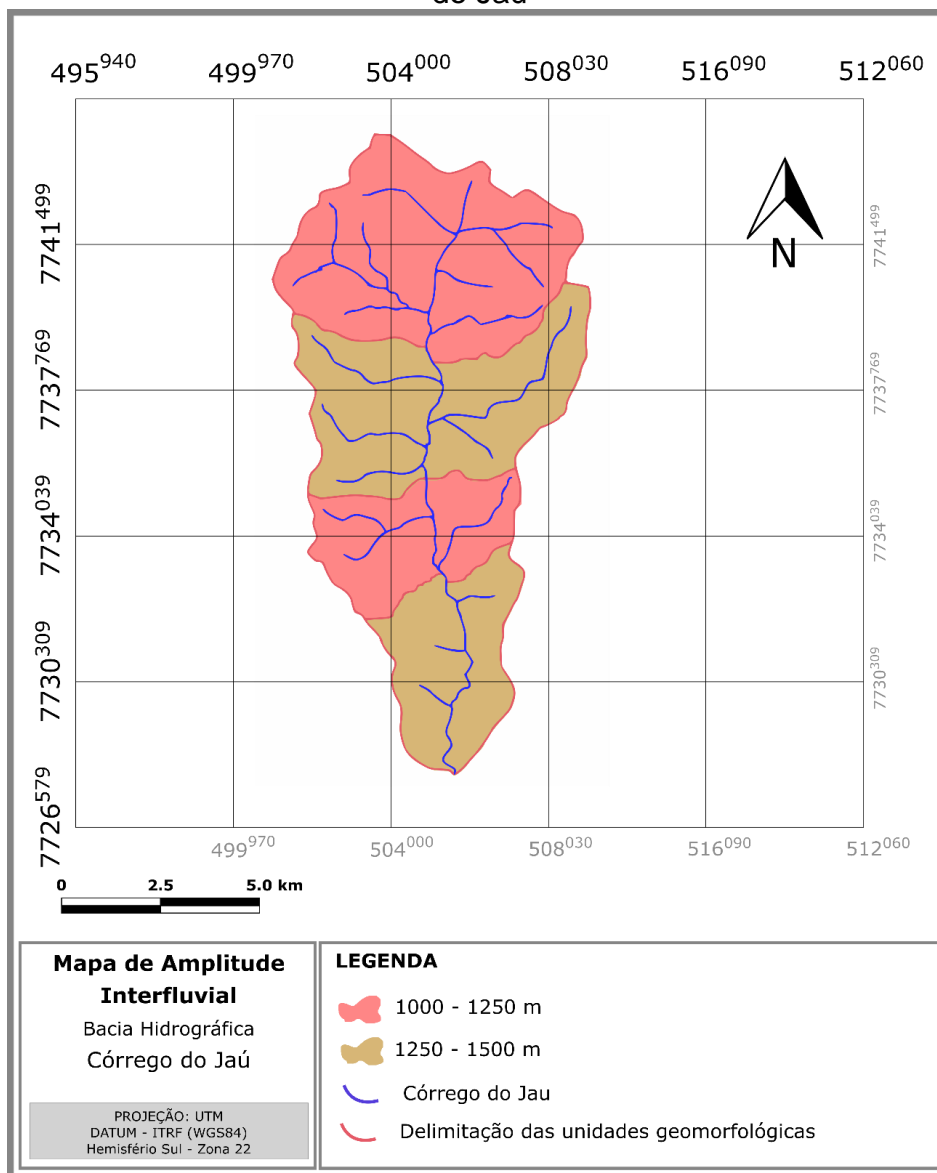
Tabela 5 - Escala de vulnerabilidade para a amplitude interfluvial

Amplitude Interfluvial (m)	Vulnerabilidade
1000 - 1250	2,6
1250 - 1500	2,5

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

Já a amplitude altimétrica relaciona-se ao aprofundamento da dissecação, indicando a energia potencial para o escoamento superficial. A Tabela 6 apresenta os valores de vulnerabilidade atribuídos a diferentes variações de amplitudes altimétricas.

Figura 9 - Mapa de amplitude interfluvial para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Por meio do uso de dados SRTM de altitude obtidos a partir do Projeto Topodata (INPE, 2018) foi elaborado então um mapa de amplitude altimétrica, dividido conforme as classes de altitude apresentadas, como mostra a Figura 10. Observa-se que os pontos de altitude mínima e máxima se encontram, respectivamente, nas classes de vulnerabilidade 1,0 e 2,3.

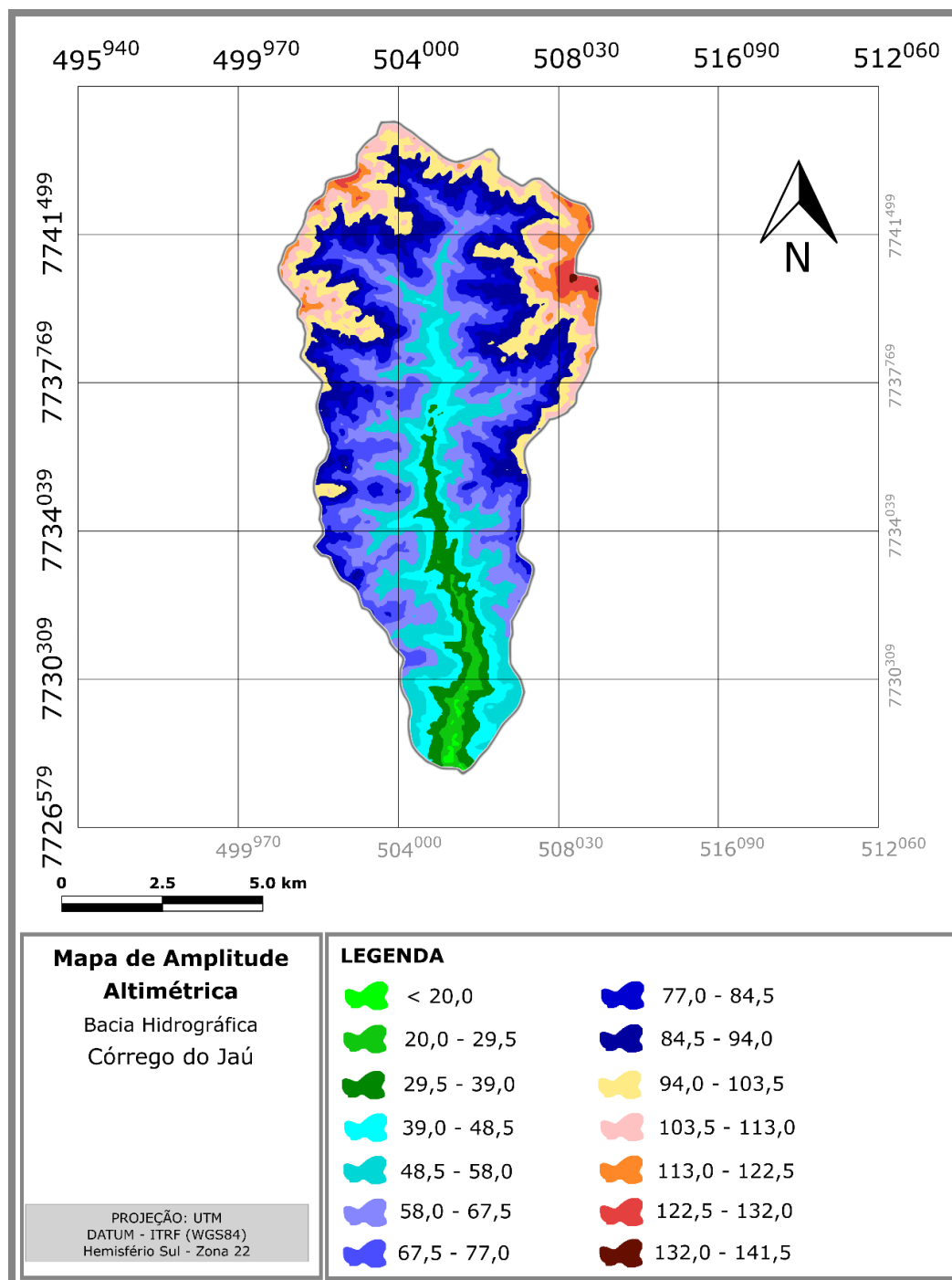
Tabela 6 - Escala de vulnerabilidade para diferentes valores de amplitude altimétrica

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

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

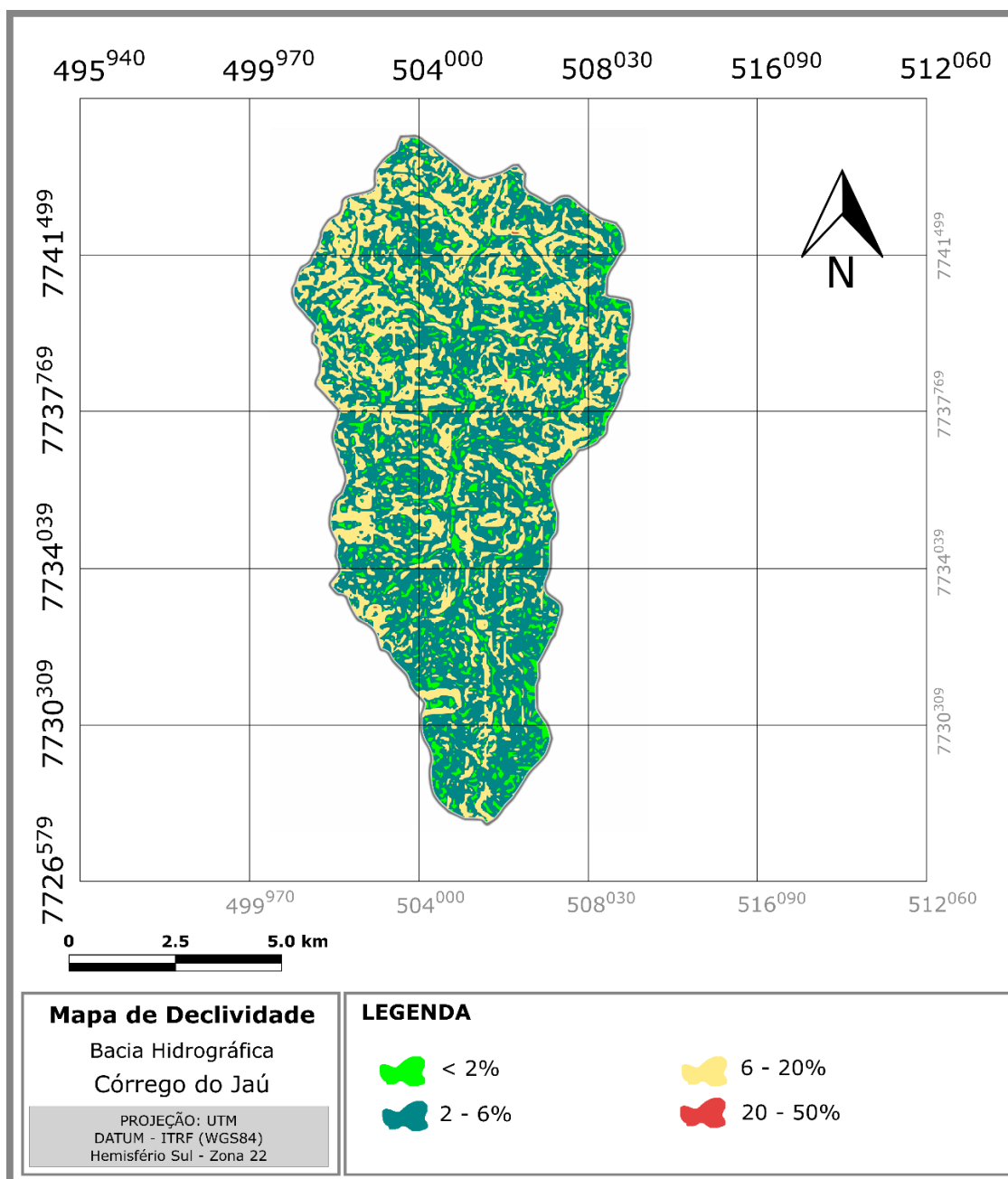
Por fim, foi calculado fator declividade, relacionado diretamente à velocidade e às condições de escoamento superficial. Os dados para a geração do mapa de declividade, mostrado na Figura 11, também foram obtidos a partir dos dados SRTM do Projeto Topodata (INPE, 2018), sendo as classes de declividade divididas conforme o proposto pela Tabela 7.

Figura 10 - Mapa de amplitude altimétrica para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Figura 11 - Mapa de declividade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Tabela 7 - Escala de vulnerabilidade para diferentes valores de declividade

Declividade (%)	Vulnerabilidade
< 2	1,0
2 - 6	1,5
6 - 20	2,0
20 - 50	2,5
> 50	3,0

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

3.2.1.3 Solos (S)

O fator Solos baseia-se na pedologia e no conceito de erodibilidade, já descrito anteriormente, sendo as classes de vulnerabilidade atribuídas segundo o tipo de solo existente no local, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Escala de vulnerabilidade para diferentes tipos de solo

Classes de solo	Vulnerabilidade
Latossolos	1,0
Argissolos	
Luvissolos	
Chernossolos	2,0
Planossolos	
Espodossolos	
Cambissolos	2,5
Neossolos	
Vertissolos	
Organossolos	3,0
Gleissolos	
Plintossolo	
Afloramento Rochoso	

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

O mapa pedológico da área de estudo, já apresentado na Figura 6 (página 51) durante a caracterização da área de estudo, apresenta dois tipos de Argissolo, Gleissolo, e Neossolo. Apesar do modelo proposto por Crepani *et al.* (2001) apresentar um único valor de vulnerabilidade para Argissolos, devido às características abruptas do Argissolo tipo PVA1, localizado na porção superior da bacia de estudo, foi atribuído um valor de vulnerabilidade ligeiramente superior ao atribuído ao Argissolo tipo PVA4. Da mesma forma, o modelo original de estimativa de vulnerabilidade à erosão coloca o Neossolo e o Gleissolo na mesma classe, porém devido às propriedades de cada um, especialmente a textura, também foi realizada uma distinção entre eles. Assim, os valores de

vulnerabilidade conferidos a cada tipo de solo podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Escala de vulnerabilidade para os tipos de solo existentes na área de estudo

Tipo de solo	Vulnerabilidade
Argissolo – PVA4	1,8
Argissolo – PVA1	2,2
Gleissolo Háplico	2,8
Neossolo Quartzarênico	3,0

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

3.2.1.4 Uso e Cobertura do Solo (U)

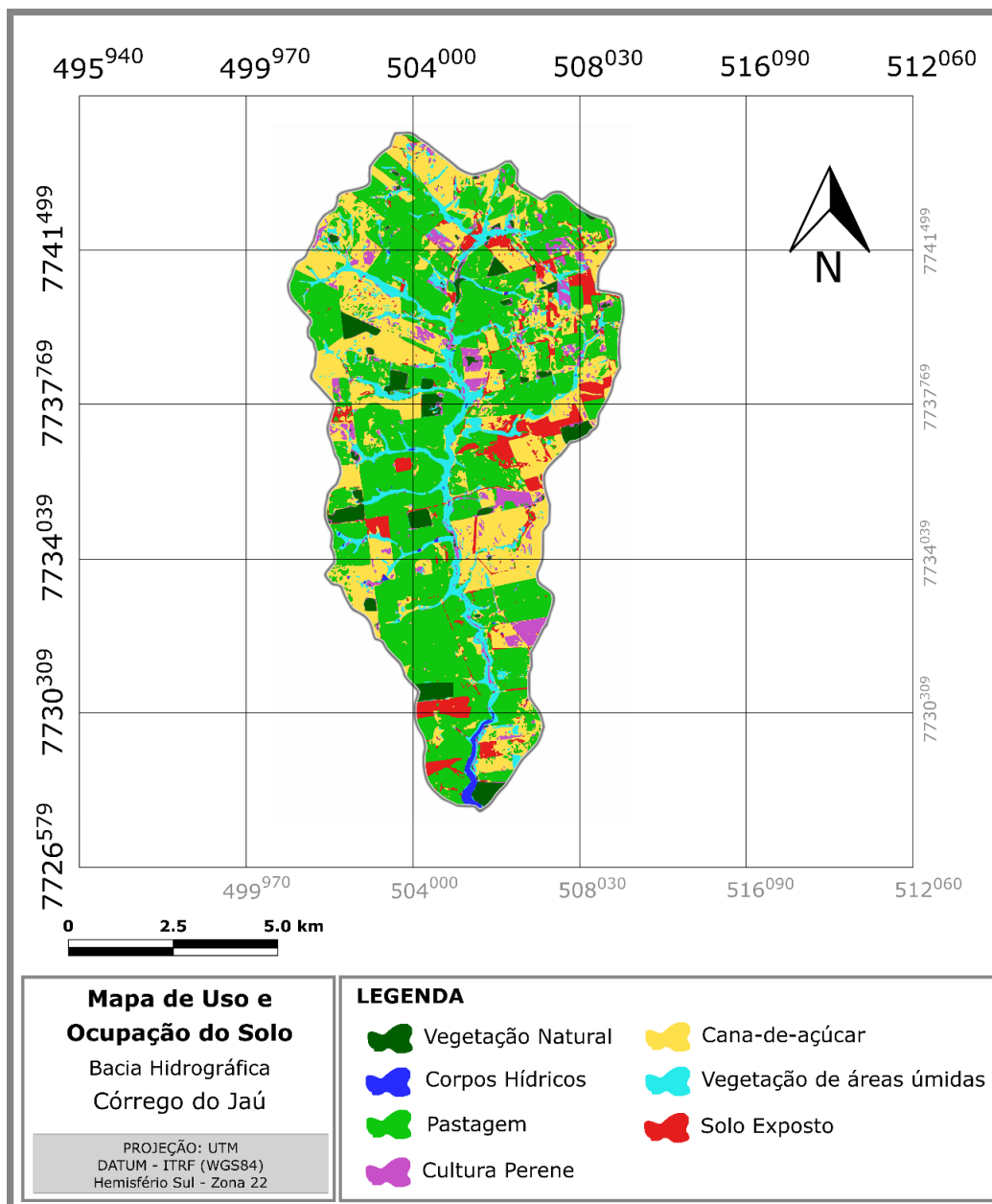
A determinação da vulnerabilidade para o fator Uso e Cobertura do Solo – tema denominado “vegetação” a princípio por Crepani *et al.* (2001) – foi feita a partir da classificação de uso e ocupação, elaborada com base em imagens de satélite Sentinel-2, datadas de 22/02/2018. Foi realizada uma classificação supervisionada por pixel (MAXVER), utilizando-se uma composição colorida pela combinação das bandas 03(B), 04(G) e 08(R) – denominada falsa cor –, com resolução de 10 metros. Para o treinamento foram definidas as classes: corpos hídricos, solo exposto, cana-de-açúcar, cultura perene, pastagem, vegetação natural, e vegetação de áreas úmidas. Em seguida foi realizado um processo de pós-classificação para reduzir eventuais distorções locais do processo de classificação.

Devido ao trabalho original de Crepani *et al.* (2001) ser voltado para a área Amazônica, o parâmetro uso e cobertura baseou-se no tipo de vegetação existente no local e na densidade de cobertura oferecida por esta vegetação. Logo, o modelo de classes aplicado ao trabalho original não seria adequado para o presente estudo. Desse modo, foram utilizadas as classes propostas por Ribeiro e Campos (2007), com algumas adaptações, uma vez que as regiões de estudo possuem características similares.

Assim, o mapa temático de uso e cobertura gerado a partir da classificação pode ser observado na Figura 12, enquanto a Tabela 10 mostra a

área ocupada por cada classe na bacia de estudo, e sua respectiva vulnerabilidade.

Figura 12 - Mapa de uso e ocupação do solo para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Deve ser notado que a classe “Cultura Semi-perene” é constituída pela cana-de-açúcar, que se enquadra nessa denominação devido ao período de renovação de talhões levar cerca de 4 anos, diferentemente das culturas temporárias, que possuem ciclo vegetativo curto, anual (IPT, 2008), de forma

que seu valor de vulnerabilidade consiste na média entre a vulnerabilidade de culturas anuais e perenes. Já a classe “Cultura Perene” pode englobar mais de um tipo de cultura, porém é composta majoritariamente pelo cultivo de citros, especialmente laranja. Por fim, a vegetação de áreas úmidas refere-se ao que muitos autores denominam “Várzea”.

Tabela 10 - Escala de vulnerabilidade e área ocupada por cada classe de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú

Classe de Uso do Solo	Área ocupada (km²)	Vulnerabilidade
Vegetação Natural	3,31	1,0
Corpos Hídricos	0,46	1,5
Pastagem	38,25	2,0
Cultura Perene	4,10	2,5
Cultura Semi-Perene	24,14	2,75
Vegetação de áreas úmidas	7,08	3,0
Solo exposto	5,29	3,0

Fonte: adaptado de Ribeiro e Campos (2007)

3.2.1.5 Clima (C)

No modelo de Crepani *et al.* (2001) o fator Clima contribui para estimativa da vulnerabilidade natural à erosão a partir da intensidade pluviométrica. Como a intensidade pluviométrica representa a energia potencial disponível no sistema para tornar-se energia cinética, e esta é responsável pela erosividade da chuva, o modelo faz uma correlação entre esses dois parâmetros.

A Tabela 11 apresenta os valores de vulnerabilidade atribuídos a diferentes variações de intensidades pluviométricas.

Devido às dimensões da área de estudo e aos dados acessíveis para o trabalho, foi considerado um único valor de intensidade pluviométrica – e consequentemente um único valor de vulnerabilidade – para toda a bacia. A média pluviométrica mensal foi estimada a partir dos dados de pluviosidade disponibilizados pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – CEPAGRI (2018), conforme observado na Tabela 12. A estimativa levou em consideração apenas os meses com maior índice de

pluviosidade, ou seja, de outubro a março, gerando um valor de 160,533 mm/mês.

Tabela 11 - Escala de vulnerabilidade referente à intensidade pluviométrica

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

Fonte: Crepani *et al.* (2001)

3.2.1.6 Geração do mapa de vulnerabilidade à erosão

Após a obtenção de todos os dados espacialmente distribuídos referentes aos parâmetros individuais e a atribuição de classes de vulnerabilidade para cada um, foi realizada a combinação desses fatores através da ferramenta LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) no software Spring. A combinação foi feita a partir da equação original proposta por Crepani *et al.* (2001), onde todos os fatores possuem o mesmo peso e, portanto, a vulnerabilidade à erosão final foi gerada a partir de uma média aritmética das vulnerabilidades dos fatores individuais.

Tabela 12 - Dados climáticos referentes ao município de Aparecida D'Oeste - SP

Aparecida D'Oeste		
Latitude: 20°16' Longitude: 50°31' Altitude: 415 metros		
Classificação Climática de Koeppen: Aw		
Mês	Temperatura média do ar (°C)	Chuva (mm)
Janeiro	25,9	221,3
Fevereiro	26	184,0
Março	25,7	170,3
Abril	24	95,9
Maio	21,8	57,5
Junho	20,8	28,7
Julho	20,7	12,0
Agosto	22,9	23,0
Setembro	24,6	67,4
Outubro	25,4	83,9
Novembro	25,5	110,1
Dezembro	27,7	193,6
Média Ano	24,1	103,975
Pluviosidade anual (mm/ano)		1247,7

Fonte: CEPAGRI (2018)

3.2.2 Aplicação da Equação Universal de Perda de Solo (USLE)

A segunda metodologia selecionada para estimar o potencial de ocorrência de erosão na bacia de estudo foi a Equação Universal de Perda de Solo, ou USLE, desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978). Esse método consiste no cálculo da perda de solo a partir de seis fatores, sendo eles: erosividade ou fator chuva (R), erodibilidade do solo (K), fator topográfico (LS), uso e cobertura do solo (C), e práticas conservacionistas (P), conforme expresso pela Equação 1 (página 30).

Inicialmente foram estimados os valores de cada um dos parâmetros que compõem a equação universal de perda de solo. Respeitando-se a concepção original de cada fator proposta por Wischmeier e Smith (1978), essa estimativa não se dará exclusivamente pelos métodos utilizados no trabalho original, uma vez que os dados disponíveis e as características da área de estudo não propiciam tal aplicação.

Sendo assim, para o cálculo de alguns dos fatores individuais incluídos na USLE foram utilizados métodos baseados em trabalhos que desenvolvem ou aplicam adaptações da metodologia original. Devido ao teor dessas adaptações, alguns trabalhos modificam inclusive a forma de intitularem a metodologia, como aqueles que se utilizam da RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), ou muitas outras.

No entanto, devido ao fato de serem mantidos os significados e conceitos originais de cada parâmetro, além de sua organização segundo a distribuição original proposta, neste trabalho será mantido o termo USLE.

Após a definição dos critérios de estimativa de cada fator, foram gerados mapas de perda de solo a partir das diferentes combinações de fatores e foi realizada a comparação entre eles.

3.2.2.1 Erosividade (R)

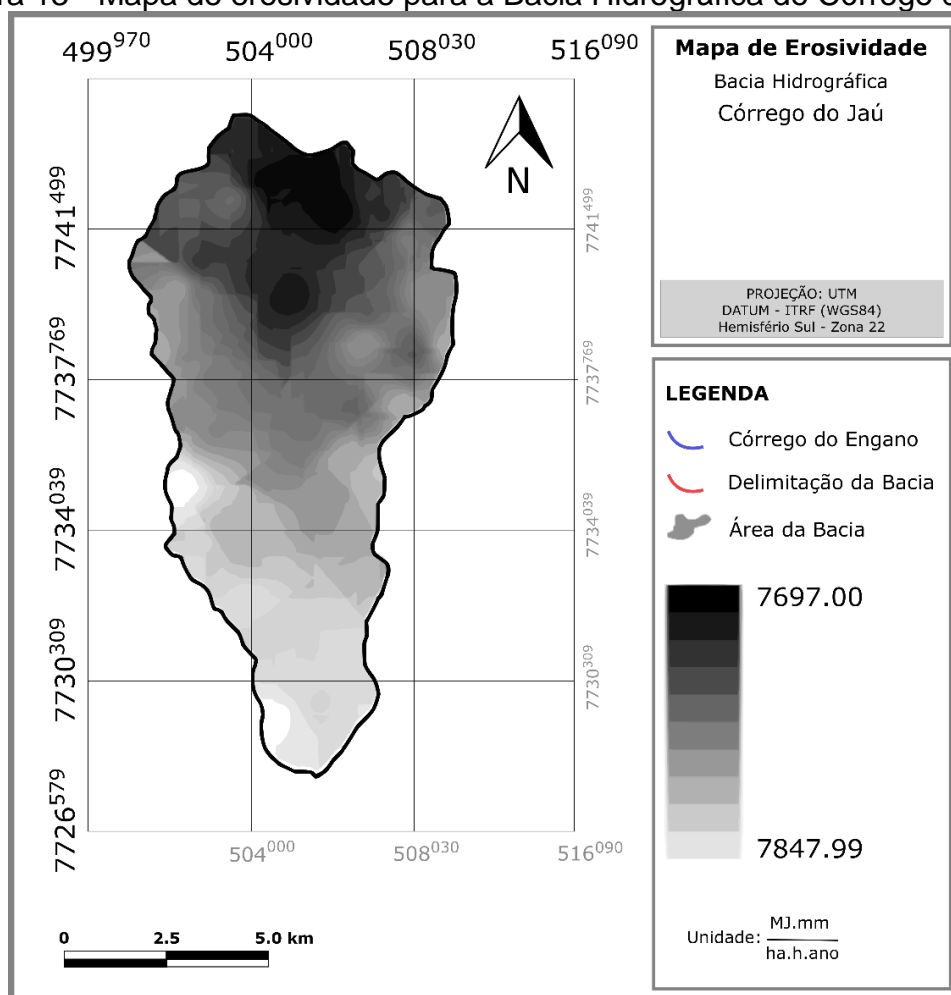
O cálculo da erosividade no trabalho original de Wischmeier e Smith (1978) foi realizado a partir de valores do EI_{30} , método que consiste no conceito de energia total da chuva (E) vezes a intensidade máxima para uma chuva de 30 minutos (I_{30}), resultando em um valor em $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$. No entanto, esse tipo de metodologia não é o mais indicado para o contexto do presente estudo, uma vez que a distribuição das estações de coleta de dados pluviométricos e a dimensão da área de estudo levariam à obtenção de um único valor de erosividade para toda a área, de forma que não seria possível identificar a variação espacial e sua conseqüente importância na distribuição de processos erosivos.

Assim, os valores de erosividade neste estudo foram obtidos através do programa netErosividade SP. A partir de dados de estações pluviométricas distribuídas pelo estado e de uma rede neural artificial, esse programa estima os valores da erosividade da chuva para qualquer local do estado de São Paulo utilizando dados de latitude, longitude e altitude. O cálculo da erosividade pelo programa é realizado a partir de dados de precipitação média anual do ano de 1961 a 1990 utilizando a equação proposta por Lombardi Neto e Mondenhauer (1992) para os pontos onde há estação pluviométrica, sendo os resultados nas

demais localidades estimados a partir de interpolação e do uso da rede neural artificial desenvolvida (MOREIRA *et al.*, 2006).

Dessa forma, foram selecionados 50 pontos aleatórios dentro da bacia e a partir de suas coordenadas geográficas e da altitude, foram encontrados os valores de erosividade pelo programa citado. Em seguida foi realizada a interpolação desses dados através do software SPRING utilizando a média quadrática para a obtenção do mapa de erosividade com resolução espacial de 10 x 10 metros, mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Mapa de erosividade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

3.2.2.2 Erodibilidade do solo (K)

O fator erodibilidade (K) trata-se da contribuição das propriedades inerentes do solo para o potencial erosivo. Ele retrata quão mais propenso à

erosão é um solo em relação ao outro quando todos os outros parâmetros considerados são iguais (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

No modelo original da USLE, os valores referentes ao fator erodibilidade foram calculados para diferentes tipos de solo existentes nos Estados Unidos, porém de acordo com os autores, a erodibilidade em si é uma função de interações complexas entre diversas propriedades físicas e químicas do solo, incluindo porcentagem de silte, matéria orgânica e granulometria, de forma que para uma mesma classificação de solo, sua erodibilidade pode variar.

Já Silva e Alvares (2005) definem as principais propriedades físicas e químicas que influenciam na resistência do solo contra a erosão como sendo a estrutura, textura, a taxa de infiltração, a permeabilidade, a densidade, a porosidade, e o teor de matéria orgânica.

Para este estudo, os valores utilizados para a erodibilidade do solo foram baseados no Levantamento Taxonômico de Solos conduzido pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos (DEFERS) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP em 41 propriedades rurais em ambientes de produção de cana-de-açúcar e áreas de pastagens pertencentes à Usina Vale do Paraná S/A (ALVES *et al.*, 2009).

A partir da localização espacial dos pontos de coleta das amostras, e através do método geoestatístico de Krigagem, foi elaborado o mapa de erodibilidade do solo para a bacia do Jaú, conforme Figura 14.

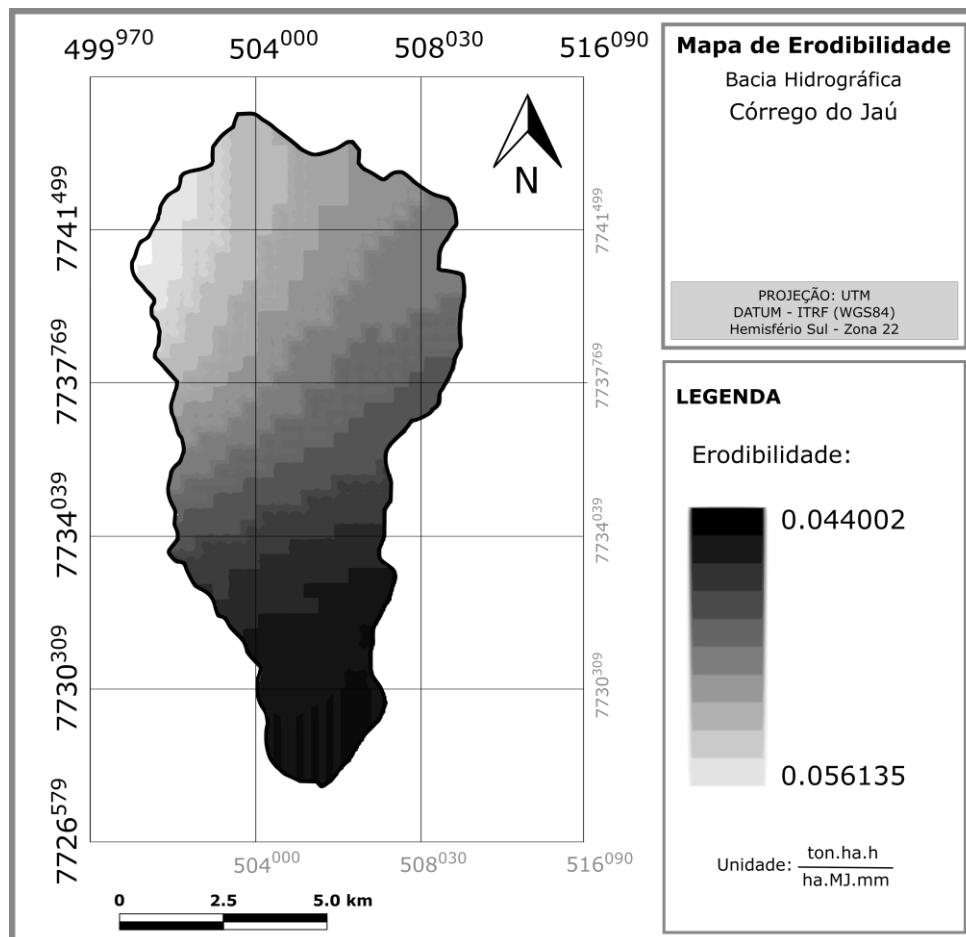
3.2.2.3 Fator topográfico

O fator topográfico (LS) é formado pela combinação dos fatores comprimento de rampa (L), que consiste na distância percorrida pela gota de chuva do momento em que ela atinge o solo até chegar ao corpo d'água, e declividade (S). Os fatores podem ser calculados individualmente através de um modelo digital de elevação (MDE) e mapa de drenagem da área, ou ainda pode ser utilizado um software para calcular automaticamente o fator LS mediante inserção dos mesmos conjuntos de dados. No presente trabalho foram utilizadas essas duas metodologias.

O cálculo do comprimento de rampa em cada ponto foi feito com base no mapa de distância entre os cursos d'água e os divisores topográficos, através da

ferramenta do software Spring de mesmo nome, de modo que os cursos d'água possuem valor zero e os divisores possuem o valor máximo de distância. A localização dos divisores de água foi baseada em uma simplificação na qual se considerou a distância média entre os cursos d'água, uma vez que para a identificação de seu local exato seria necessária a inserção manual (o que dependeria muito tempo) ou a utilização de operações mais complexas, que não são o foco do trabalho.

Figura 14 - Mapa de erodibilidade para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Já a declividade foi obtida através dos dados SRTM do Projeto Topodata (VALERIANO, 2008), e ambos os dados – declividade e comprimento de rampa – foram combinados através de um LEGAL para serem posteriormente inseridos na USLE.

Após a obtenção dos dados de declividade e comprimento de rampa, esses valores foram combinados através de um LEGAL utilizando a Equação 4 (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999) para geração do fator LS.

$$LS = 0,00984 L^{0,63} S^{1,18} \quad (\text{Equação 4})$$

sendo:

L = comprimento de rampa em metros

S = declividade em %

Para o cálculo direto do fator LS foi utilizado o software SAGA (CONRAD *et al.*, 2015), no qual foi inserido o modelo digital de elevação (mapa de altimetria) obtido também a partir dos dados SRTM do Projeto Topodata (VALERIANO, 2008). Dentre as possíveis metodologias de cálculo para esse fator disponíveis no software, foi selecionada aquela desenvolvida por Boehner e Selige (2006), por ser a mais atualizada.

3.2.2.4 Uso e cobertura do solo

O fator uso e cobertura do solo (C) refere-se à relação entre a perda de solo sob determinadas condições específicas de cobertura e aquela esperada para um solo exposto sem nenhuma proteção, e é adimensional (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Para a determinação do fator uso e cobertura do solo foi utilizado o mesmo mapa de uso e cobertura já apresentado anteriormente na Figura 12.

O valor atribuído a cada categoria de uso foi retirado do trabalho de Silva *et al.* (2010), uma vez que tanto os tipos de uso e cobertura quanto as características das regiões de estudo são parecidas.

A Tabela 13 mostra os valores para o fator C. Aos corpos hídricos foi atribuído o valor zero, pois não há ocorrência de erosão para este tipo de uso, e ao solo exposto foi atribuído o valor “1” pois não há nenhum tipo de cobertura que proteja o solo e, portanto, que influencie na perda de solo do local. Além disso, como o trabalho de Silva *et al.* (2010) não abrange nenhum tipo de vegetação de áreas úmidas, foi utilizado o estudo de Medeiros *et al.* (2016).

Tabela 13 - Classes do fator uso e cobertura do solo

Classe de Uso do Solo	Fator C
Vegetação Natural	0,0004
Pastagem	0,05
Cana-de-açúcar	0,1124
Cultura Perene - Citrus	0,135
Vegetação de áreas úmidas	0,0001
Corpos Hídricos	0
Solo exposto	1

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2010) e Medeiros *et al.* (2016)

3.2.2.5 Práticas conservacionistas

As práticas conservacionistas tratam-se daquelas que retardam o escoamento superficial e, portanto, diminuem a quantidade de solo carregada por ele (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Alguns exemplos são terraceamento e plantio em nível.

O fator relativo às práticas conservacionistas (P) é definido então como a relação entre a perda de solo com uma prática de suporte específica e perda referente a um plantio “morro abaixo”.

Devido à dimensão da área de estudo e ao fato de a região contar com diversas propriedades de diferentes tamanhos, cada uma podendo apresentar variadas práticas de plantio, não foi possível identificar as práticas específicas de cada local. No entanto, foi observado a partir da análise visual de imagens de satélite que a maior parte das propriedades conta com plantio em nível, independentemente da classe de uso do solo. Esta situação foi confirmada durante a visita a campo, onde, por amostragem, foi observado que diversas propriedades possuem algum tipo de prática conservacionista, especialmente o plantio em nível.

Assim, foi testada a aproximação sugerida por Silva *et al.* (2010) para o fator P com base na declividade do terreno para áreas com plantio em nível, e a perda de solo resultante foi comparada àquela desconsiderando a existência de práticas conservacionistas.

De acordo com o trabalho desses autores, para declividades menores que 0,5% foi atribuído o valor $P=0,6$, para declividades maiores que 20% foi atribuído o valor $P=1$, e para declividades entre 0,5% e 20% foi utilizada a Equação 5.

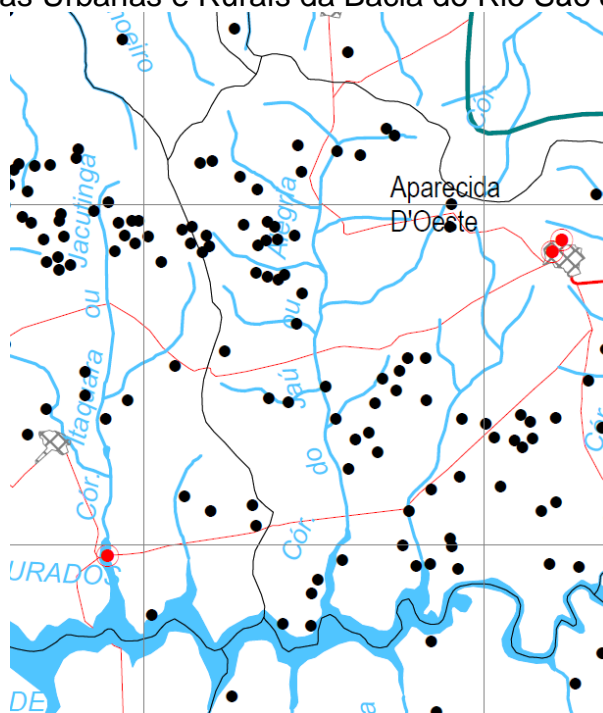
$$P = 0,69947 - 0,08911D + 0,01184D^2 - 0,000335D^3 \quad (\text{Equação 5})$$

3.2.3 Comparação com registros de ocorrência de processos erosivos

Após a elaboração de diversos mapas de potencial de ocorrência de erosão gerados a partir dos diferentes métodos de estimativa aplicados, os resultados foram comparados com dados reais de feições erosivas existentes na área de estudo.

Foram utilizadas duas fontes para obtenção desses dados, sendo uma delas o Mapa de Feições Erosivas Urbanas e Rurais da Bacia do Rio São José dos Dourados, desenvolvido pela Cooperativa de Serviços e Pesquisas Tecnológicas e Industriais – CPTI e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2008), onde estão apresentados os pontos identificados como feições erosivas lineares (ravinas e voçorocas) obtidos a partir de três diferentes estudos, desenvolvidos de 1989 a 2006, conforme Figura 15. A segunda forma de obtenção dos dados de erosão foi através da análise de imagens de satélite de alta resolução através do programa Google Earth Pro (GOOGLE, 2018) e identificação visual de feições erosivas, como mostrado na Figura 16.

Figura 15 - Registros de erosões na região de estudo de acordo com o Mapa de Feições Erosivas Urbanas e Rurais da Bacia do Rio São José dos Dourados



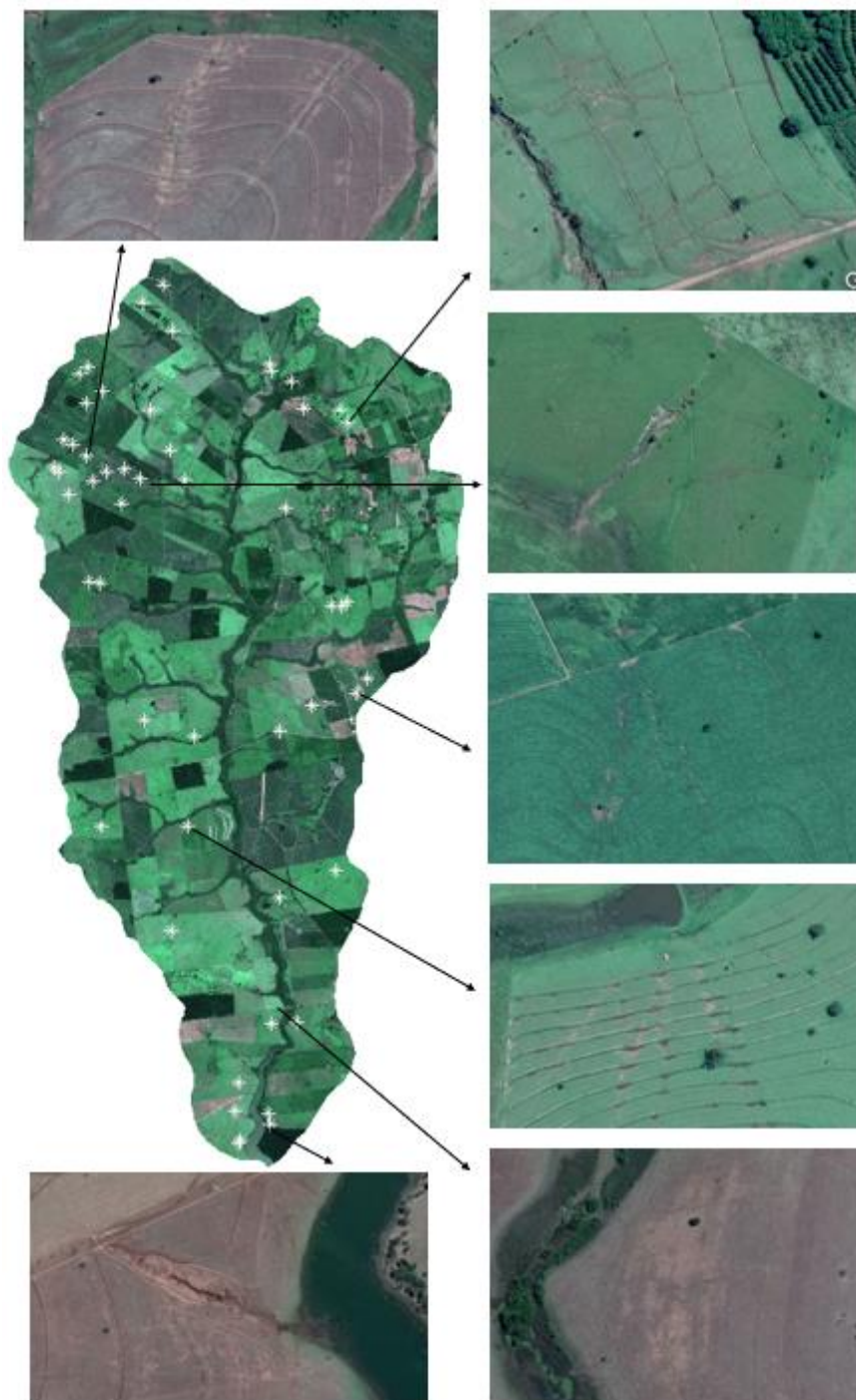
Fonte: CPTI e IPT (2008)

Por fim, foi realizada uma visita a campo na bacia de estudo para reconhecimento da área.

A visita teve como objetivos conferir alguns pontos onde já haviam sido identificadas ocorrências de processos erosivos pelas imagens de satélite, confirmar a presença de práticas conservacionistas nas propriedades, além de checar a real situação da bacia do Córrego do Jaú, evitando surpresas quanto a possíveis situações atípicas no local.

A visita foi realizada a partir de estradas e caminhos públicos que cruzam a bacia, não sendo permitido o acesso completo à área de estudo devido ao fato de as propriedades serem particulares e muitas não permitirem o fácil acesso. Desse modo, só puderam ser inspecionadas as áreas que margeiam essas vias.

Figura 16 - Processos erosivos identificados através de análise de imagens de satélite do Google Earth Pro (GOOGLE, 2018)



Fonte: autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VULNERABILIDADE NATURAL À EROSÃO (VNE)

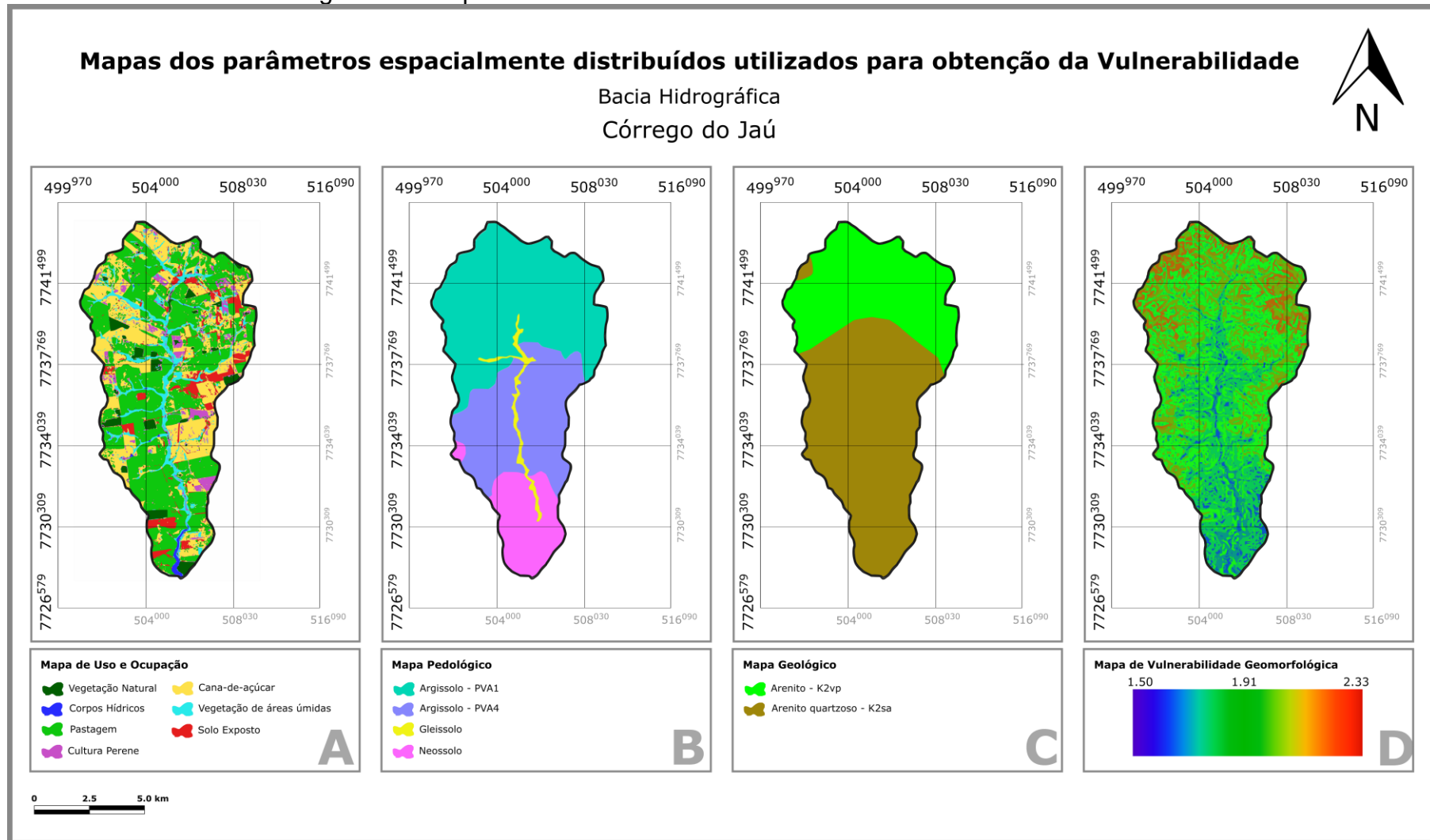
São apresentados na Figura 17 os mapas referentes aos quatro parâmetros espacialmente distribuídos na bacia analisados para obter a vulnerabilidade à erosão de acordo com o método de Crepani *et al.* (2001). O fator clima não foi representado por mapa por tratar-se de um único valor para toda a bacia.

A partir da combinação desses fatores foi gerado o mapa de vulnerabilidade natural à erosão apresentado na Figura 18, no qual as cores quentes representam uma maior vulnerabilidade enquanto as cores frias representam maior estabilidade, dentro da variação de valores encontrados, que foi de 1,6 a 2,5.

Observa-se pela Figura 18 que os maiores valores de vulnerabilidade se encontram ao longo do leito principal do córrego e na parte inferior da bacia, próxima ao exutório, além de uma pequena área na extremidade oeste da bacia. Essas duas últimas áreas evidenciam a relevância do fator pedológico no resultado, uma vez que a presença do Neossolo é o fator comum entre elas, além da presença de solo exposto e cana-de-açúcar para o fator uso e cobertura do solo. Já a maior vulnerabilidade ao longo do leito do córrego se dá não somente devido à presença do Gleissolo – segundo pior solo em termos de vulnerabilidade –, mas principalmente devido à cobertura do local, que é a vegetação de áreas úmidas e possui vulnerabilidade 3,0, a máxima conferida pelo método.

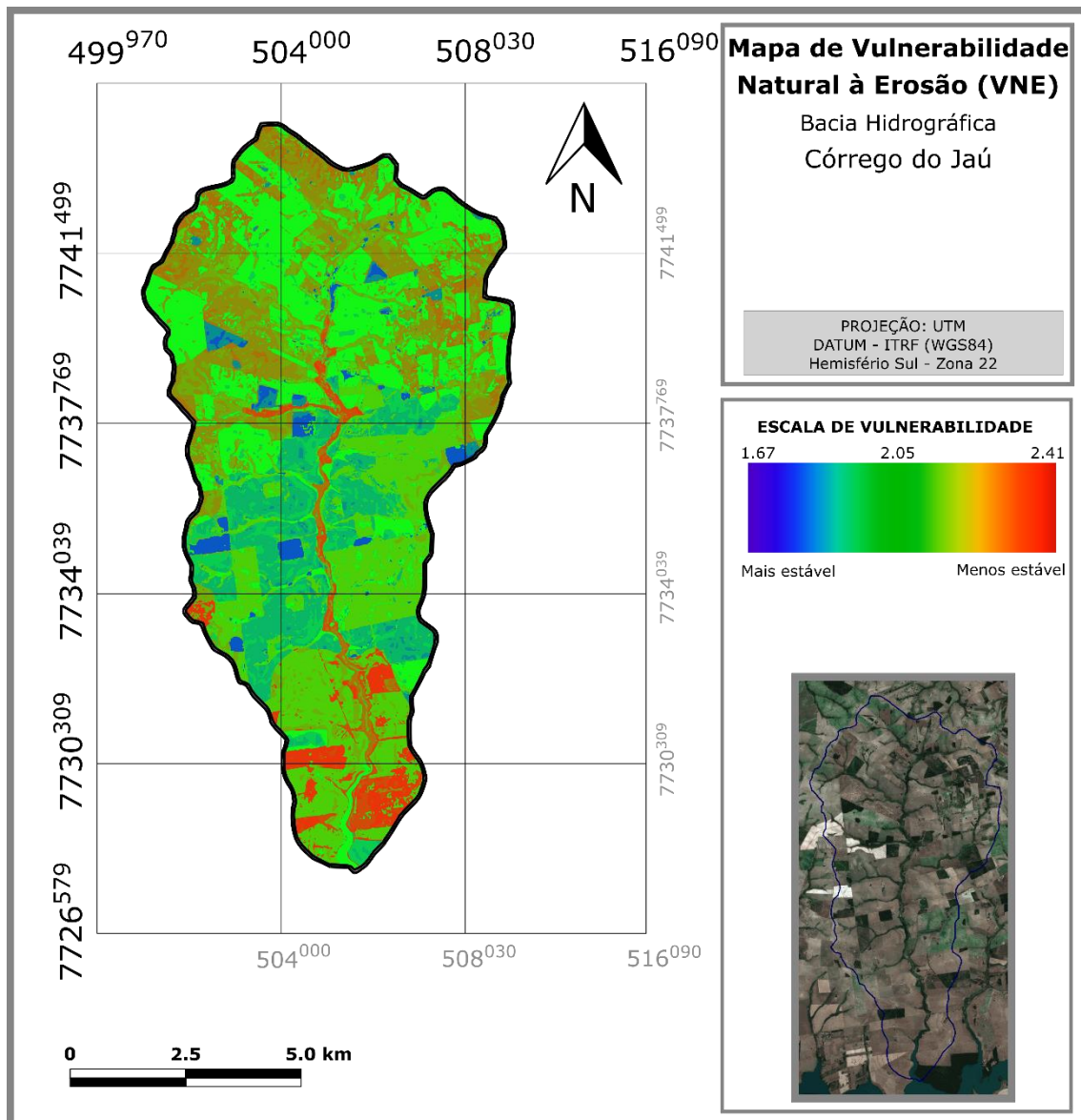
Enquanto isso, os locais classificados como menor vulnerabilidade se localizam nas porções central e superior da bacia, sendo nitidamente os locais cuja cobertura do solo é a vegetação natural, que possui a menor vulnerabilidade atribuída pelo método: 1,0. Além disso, é possível notar que a parte central da bacia de modo geral possui um grau de vulnerabilidade ligeiramente inferior aos das extremidades, devido ao tipo de solo do local, que é o mais estável entre eles.

Figura 17 - Mapa utilizados no método da Vulnerabilidade Natural à Erosão



Fonte: autoria própria

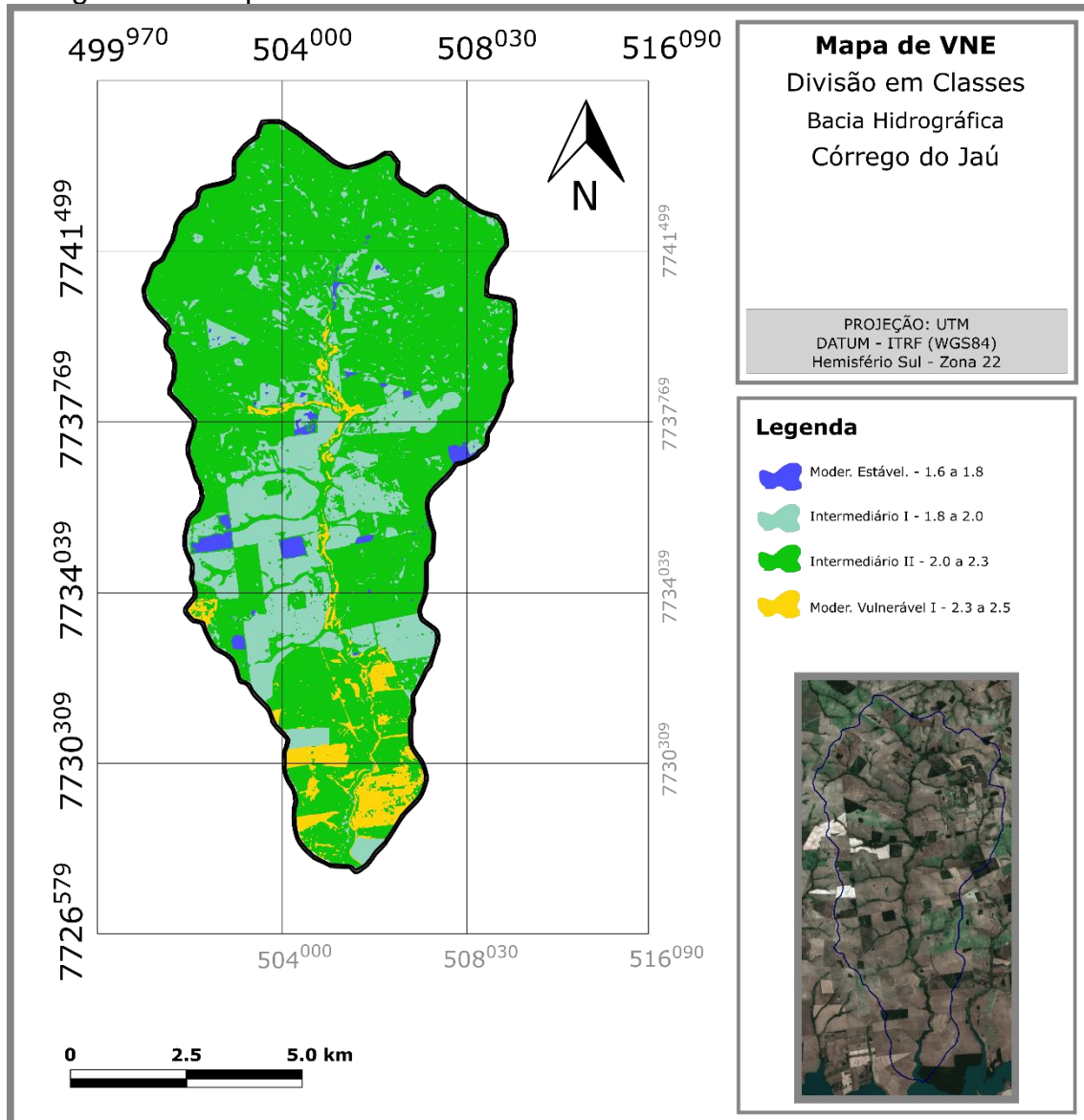
Figura 18 - Mapa de Vulnerabilidade Natural à Erosão para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Apesar de no mapa apresentado ser possível identificar claramente as áreas de maior e menor estabilidade, devido à grande variação de cores, quando os resultados de vulnerabilidade são comparados à escala geral apresentada pelo método, nota-se que a variação não é tão grande assim. A Figura 19 mostra um mapa classificado entre os graus de vulnerabilidade apontados pelo método, havendo apenas uma divisão na classe intermediária, representada pelos dois tons de verde.

Figura 19 - Mapa de Vulnerabilidade Natural à Erosão dividido em classes



Fonte: autoria própria

Para uma melhor análise da distribuição da vulnerabilidade, a Tabela 14 mostra ainda a área ocupada por cada intervalo de valores e a porcentagem referente à área total da bacia.

A partir da Figura 19 e da Tabela 14 é possível perceber certa homogeneidade nos valores de vulnerabilidade distribuídos pela bacia, estando mais de 90% da área da mesma sob o grau de vulnerabilidade intermediário.

Esses resultados não querem dizer necessariamente que a bacia possui características homogêneas, e sim é uma consequência do método, que atribui pesos iguais para todos os fatores. Assim, uma área com um tipo de rocha desfavorável e um tipo de cobertura favorável pode apresentar a mesma

vulnerabilidade de uma área com características opostas. Além disso, mesmo havendo características extremamente negativas em uma área, elas podem ser amenizadas por outra característica extremamente positiva, e a vulnerabilidade final resultará no mesmo valor de outra área em que todos os fatores são intermediários.

Tabela 14 - Graus de vulnerabilidade e a respectiva área ocupada da bacia

Graus de vulnerabilidade		Área Ocupada (km ²)	% de Área Ocupada	Área Ocupada (km ²)	% de Área Ocupada
Moderadamente estável	1,6 a 1,7	0,02	0,02	1,26	1,5
	1,7 a 1,8	1,24	1,5		
Intermediário	1,8 a 1,9	2,39	2,9	76,51	93,01
	1,9 a 2,0	15,51	18,9		
	2,0 a 2,1	18,02	21,9		
	2,1 a 2,2	23,46	28,5		
	2,2 a 2,3	17,12	20,8		
Moderadamente vulnerável	2,3 a 2,4	4,43	5,4	4,49	5,46
	2,4 a 2,5	0,05	0,1		

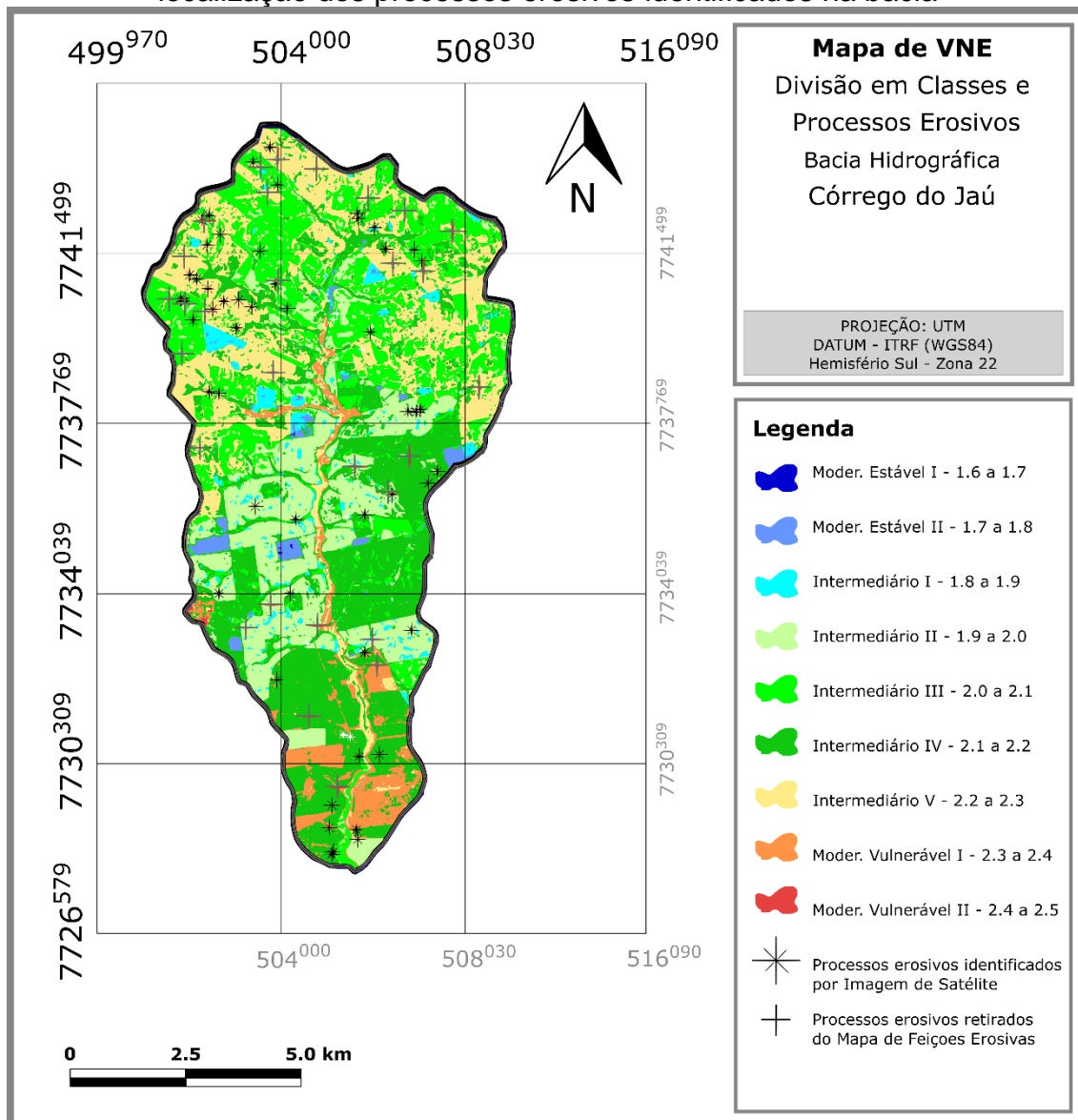
Fonte: autoria própria

Para testar a eficácia do método na previsão dos locais mais vulneráveis à erosão na bacia de estudo, o mapa de vulnerabilidade foi confrontado com os pontos onde foram identificadas ocorrências de processos erosivos.

A Figura 20 mostra o mapa de vulnerabilidade classificado detalhadamente e os processos erosivos tanto obtidos a partir do Mapa de Feições Erosivas (CPTI; IPT, 2008) quanto identificados através de análise visual pelo software Google Earth, com visita a campo para conferência de alguns deles.

Nota-se que existem algumas áreas com um agrupamento significativo de pontos (clusters) na região noroeste, nordeste e sul da bacia, além de outros pontos espalhados por todo o mapa. Através de uma análise superficial do mapa, aparentemente a maior parte dos pontos se encontra em área de vulnerabilidade intermediária a moderadamente vulnerável, porém faz-se necessária uma análise mais detalhada.

Figura 20 - Mapa classificado da Vulnerabilidade Natural à Erosão com a localização dos processos erosivos identificados na bacia



Fonte: autoria própria

A Tabela 15 apresenta a quantidade de processos erosivos identificados para cada intervalo de vulnerabilidade, além da densidade de erosões para cada um deles.

Os dados da Tabela 15 corroboram o resultado da análise do mapa, mostrando uma maior quantidade e densidade de pontos na categoria intermediária superior de vulnerabilidade, porém indicam uma queda na ocorrência de erosões em áreas moderadamente vulneráveis.

Tabela 15 - Quantidade e densidade de processos erosivos por grau de vulnerabilidade

Graus de vulnerabilidade		Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km ²)	Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km ²)
Moderadamente estável	1,6 a 1,7	0	0	0	0
	1,7 a 1,8	0	0		
Intermediário	1,8 a 1,9	1	0,42	85	1,1
	1,9 a 2,0	16	1,03		
	2,0 a 2,1	23	1,28		
	2,1 a 2,2	15	0,64		
	2,2 a 2,3	30	1,75		
Moderadamente vulnerável	2,3 a 2,4	4	0,90	4	0,89
	2,4 a 2,5	0	0		

Fonte: autoria própria

Esses resultados indicam que o método funcionou bem para a identificação de áreas mais estáveis, pois aquelas caracterizadas como moderadamente estáveis não apresentaram nenhuma ocorrência de erosão.

A categoria intermediária, por sua vez, é muito abrangente e poderia ser dividida em duas para melhor distinção entre as áreas. Pode ser observado um claro aumento na densidade de ocorrência de processos erosivos conforme o aumento da vulnerabilidade (com exceção do intervalo entre 2,1 a 2,2), o que parece indicar o bom funcionamento do método para áreas nessa categoria.

Já a identificação das áreas mais vulneráveis não ocorreu conforme o esperado, pois a densidade de pontos para o grau moderadamente vulnerável foi inferior à densidade observada no grau intermediário.

Essas discrepâncias, embora pequenas, podem ter sido causadas, por exemplo, pela falta de determinação de níveis de importância entre os atributos, ou ainda devido a técnicas de manejo não consideradas pelo método.

Para verificar se há uma relação mais expressiva entre a ocorrência de erosão e algum fator específico, foi feita uma análise da densidade de processos erosivos para alguns parâmetros individualmente.

A Tabela 16 apresenta a análise referente ao fator uso e cobertura do solo.

Nota-se que a classe de cobertura com a maior densidade de processos erosivos é o solo exposto, o que confirma a alta vulnerabilidade atribuída a esse tipo de cobertura.

Tabela 16 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes de Uso e Cobertura do solo

Classes de uso e cobertura	Área Ocupada (km²)	% de Área Ocupada	Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km²)
Vegetação Natural	3,31	4,0%	0	0,00
Corpos hídricos	0,46	0,6%	0	0,00
Pastagem	38,25	46,3%	50	1,31
Cultura perene	4,10	5,0%	1	0,24
Cana-de-açúcar	24,14	29,2%	23	0,95
Vegetação de áreas úmidas	7,08	8,6%	2	0,28
Solo exposto	5,29	6,4%	13	2,46

Fonte: autoria própria

O segundo tipo de cobertura com maior densidade de erosões é a pastagem, sendo também a cobertura que mais ocupa área da bacia, quase 50% dela. No entanto, sua vulnerabilidade de acordo com os pesos atribuídos seria menor do que a da cultura perene, cana-de-açúcar e vegetação de áreas úmidas, todas classes com densidades de processos erosivos muito menores.

Um dos motivos para tal discrepância poderia ser o fato de que a proteção fornecida ao solo pela pastagem depende de suas condições, como seu vigor, e na maior parte das áreas o que encontra-se é apenas pastagem degradada.

Outra provável explicação para essa situação é que o valor do fator C atribuído à pastagem leva em consideração a cobertura do solo promovida por esse tipo de vegetação, que é muito boa e protege bastante o solo, recebendo, portanto, um valor de vulnerabilidade baixo. No entanto, observando a forma e localização dos processos erosivos na bacia, tanto através da análise das imagens de satélite quanto durante a visita a campo, verificou-se que muitas dessas erosões em pastagens devem-se ao caminho percorrido pelo gado para beber água e se alimentar. Esse fato indica que a real vulnerabilidade dessas áreas se refere ao tipo de uso e não de cobertura do solo. Assim, apesar desses termos (uso e cobertura) serem frequentemente usados de em conjunto para especificar certo tipo de classificação do solo, esses não necessariamente significam a mesma coisa.

Dessa forma, em uma próxima análise pode ser interessante testar uma mudança nos valores de vulnerabilidade para os diferentes tipos de uso e cobertura do solo.

A análise feita para o fator pedologia é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes pedológicas

Classes de solos	Área Ocupada (km²)	% de Área Ocupada	Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km²)
Argissolo – PVA4	26,79	32,42%	22	0,82
Argissolo – PVA1	41,45	50,15%	52	1,25
Gleissolo	1,98	2,39%	0	0,00
Neossolo	12,42	15,03%	15	1,21

Fonte: autoria própria

Percebe-se que a diferença entre o número de processos erosivos por km² para o Argissolo tipo PVA1 e para o Neossolo é muito pequena, e não há nenhuma erosão identificada no Gleissolo, solo com um valor de vulnerabilidade intermediário entre os outros dois. Essas ocorrências contribuem para a hipótese de que o parâmetro pedologia não seria o mais significativo na determinação da vulnerabilidade ou estabilidade de uma área.

No entanto, o Argissolo PVA4, considerado o mais estável, realmente apresentou uma densidade bem menor de erosões do que os outros tipos de solos, indicando que este parâmetro é sim relevante, ao menos para a determinação de áreas mais estáveis.

A Tabela 18 mostra a análise referente ao parâmetro geologia.

Tabela 18 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para as classes geológicas

Classes de rochas	Área Ocupada (km²)	% de Área Ocupada	Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km²)
Arenito k2vp	26,79	31,0238	45	1,45
Arenito k2sa	41,45	51,5988	44	0,85

Fonte: autoria própria

De acordo com a Tabela 18, o número de processos erosivos em ambas as formações geológicas é quase igual, porém como o arenito tipo k2sa ocupa

uma área maior, a densidade de erosões torna-se menor. O resultado mostrou-se então contrário à relação estabelecida previamente entre eles, em que se considerava o arenito tipo k2vp menos vulnerável. No entanto, como a diferença de vulnerabilidades atribuídas a eles é muito pequena, é pouco provável que uma alternância de valores, por exemplo, alterasse o resultado final de forma relevante.

O fator clima é homogêneo para toda a bacia, não podendo ser discutida sua distribuição espacial. Já o fator geomorfologia foi obtido através de outros parâmetros, não tendo sido feita uma classificação específica para ele, porém como o mesmo é composto, entre outros, pela declividade, foi realizada uma análise para este parâmetro, conforme mostrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Relação entre a área ocupada e a quantidade de processos erosivos existentes para o fator Declividade

Classes de declividade	Área Ocupada (km²)	% de Área Ocupada	Processos erosivos	Densidade de erosões (qtde/km²)
< 2 %	7,46	9,02%	6	0,80
2 - 6 %	48,60	58,81%	43	0,88
6 - 20 %	26,57	32,15%	40	1,51
20 - 50 %	0,02	0,02%	0	0

Fonte: autoria própria

Observa-se que o aumento da densidade de processos erosivos condiz com o aumento da declividade e a vulnerabilidade atribuída a cada classe desse parâmetro. Sendo assim, esse fator poderia ser de grande relevância no contexto geral, porém como sua importância é reduzida devido à subdivisão do fator geomorfologia, esse parâmetro acaba não sendo tão significativo quanto poderia.

Assim, o método funcionou relativamente bem, atendendo às expectativas de uma análise preliminar, porém alguns ajustes seriam necessários para aumentar sua eficácia na previsão de ocorrência de processos erosivos.

Além disso, é importante ressaltar que o intuito do estudo é mais avaliar a relação espacial – ou distribuição – entre áreas mais ou menos vulneráveis, do que o valor absoluto de vulnerabilidade ou suscetibilidade à ocorrência de erosão de forma geral.

4.2 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)

Foram realizadas quatro combinações principais entre os fatores integrantes da USLE, variando a forma de obtenção do fator LS e a inclusão ou não do fator P. Foram utilizados os mesmos valores de erosividade, erodibilidade e uso e cobertura do solo para todos os cálculos.

A Tabela 20 mostra a área ocupada por cada uma das dezoito classes de perda de solo utilizadas para representação da bacia, assim como a porcentagem de área ocupada por cada uma delas, sendo destacadas as classes mais significativas em cada caso.

Tabela 20 - Perdas de solo estimadas na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú

Perda de solo estim.	Fator LS simplificado		Fator LS SAGA		Fator LS simplificado + Fator P		Fator LS SAGA + Fator P	
	Área (km ²)	% Ocupada	Área (km ²)	% Ocupada	Área (km ²)	% Ocupada	Área (km ²)	% Ocupada
0 - 1	11,01	13,4%	5,44	6,6%	11,36	13,8%	8,20	10,0%
1 - 5	1,28	1,6%	6,68	8,1%	2,47	3,0%	5,27	6,4%
5 - 10	2,03	2,5%	1,94	2,4%	5,40	6,6%	2,01	2,4%
10 - 15	2,68	3,3%	1,03	1,2%	7,26	8,8%	0,86	1,0%
15 - 20	3,33	4,0%	0,44	0,5%	7,24	8,8%	1,65	2,0%
20 - 30	7,50	9,1%	0,98	1,2%	12,23	14,9%	0,76	0,9%
30 - 40	7,44	9,0%	1,80	2,2%	8,53	10,4%	1,51	1,8%
40 - 50	6,82	8,3%	0,44	0,5%	5,84	7,1%	0,88	1,1%
50 - 60	5,77	7,0%	0,08	0,1%	4,06	4,9%	1,05	1,3%
60 - 80	8,53	10,4%	1,85	2,2%	5,12	6,2%	1,61	2,0%
80 - 100	5,67	6,9%	0,71	0,9%	2,90	3,5%	1,96	2,4%
100 - 120	3,95	4,8%	1,39	1,7%	1,74	2,1%	1,35	1,6%
120 - 150	3,97	4,8%	0,93	1,1%	1,53	1,9%	2,49	3,0%
150 - 200	3,66	4,5%	2,61	3,2%	1,40	1,7%	2,76	3,3%
200 - 300	2,96	3,6%	4,23	5,1%	1,48	1,8%	5,89	7,1%
300 - 500	1,77	2,2%	6,02	7,3%	1,71	2,1%	11,79	14,3%
500 - 1000	2,05	2,5%	16,40	19,9%	1,54	1,9%	17,19	20,9%
> 1000	1,85	2,3%	29,38	35,7%	0,49	0,6%	15,12	18,4%
Total	82,3	100%	82,4	100%	82,3	100%	8,20	100%

Fonte: autoria própria

Na Figura 21 são apresentados os mapas de perda de solo gerados utilizando-se o fator LS obtido através do método simplificado (calculado a partir da declividade e comprimento de rampa combinados através da Equação 4),

também referido no trabalho como simplificado. Pode ser feita, então, a comparação entre o cenário em que se considerou a existência da prática de plantio em nível para toda a bacia (Figura 21B) e a situação em que se desconsiderou a existência de qualquer prática conservacionista (Figura 21A).

Observa-se uma predominância de tons amarelados no Mapa A e de tons verde azulados no Mapa B, o que demonstra claramente uma diminuição geral na perda de solo prevista para a bacia a partir da utilização de práticas conservacionistas. Esta análise pode ser confirmada pela Tabela 20, na qual verifica-se que desconsiderando-se o fator P há preponderância de perdas de solo entre 20 e 80 ton ha⁻¹ano⁻¹, enquanto se forem consideradas as práticas conservacionistas esses valores mudam para 10 a 50 ton ha⁻¹ano⁻¹.

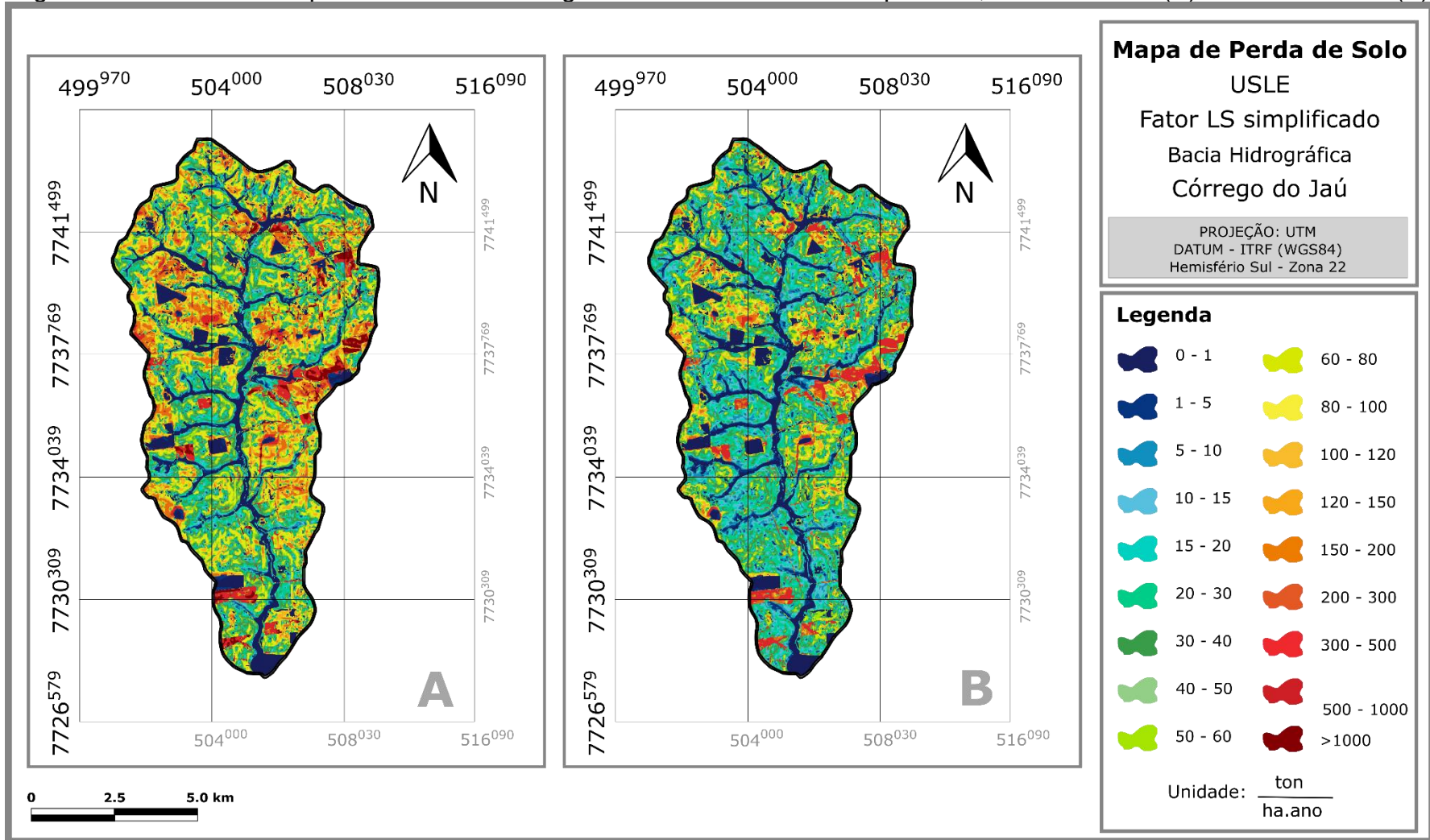
Nota-se ainda que estão dentro da categoria de menor estimativa de perda de solo as áreas ocupadas por vegetação natural e a maior parte do leito principal do córrego Jaú, coberto por vegetação de áreas úmidas. A perda de solo nessas áreas pouco variou com a inclusão das práticas conservacionistas, como pode ser observado na Tabela 20, havendo em ambos os casos uma porcentagem expressiva (mais de 10%) da bacia apresentando perdas entre 0 e 1 ton.ha⁻¹.ano⁻¹.

Já as áreas com perdas de solo estimadas mais extremas são aquelas que não possuem nenhum tipo de cobertura vegetal (solo exposto), o que evidencia a influência do fator uso e cobertura do solo.

Ainda na Figura 21 podem ser identificadas regiões com uma grande concentração de áreas com alta perda de solo localizadas nas regiões noroeste, nordeste, leste e sul da bacia.

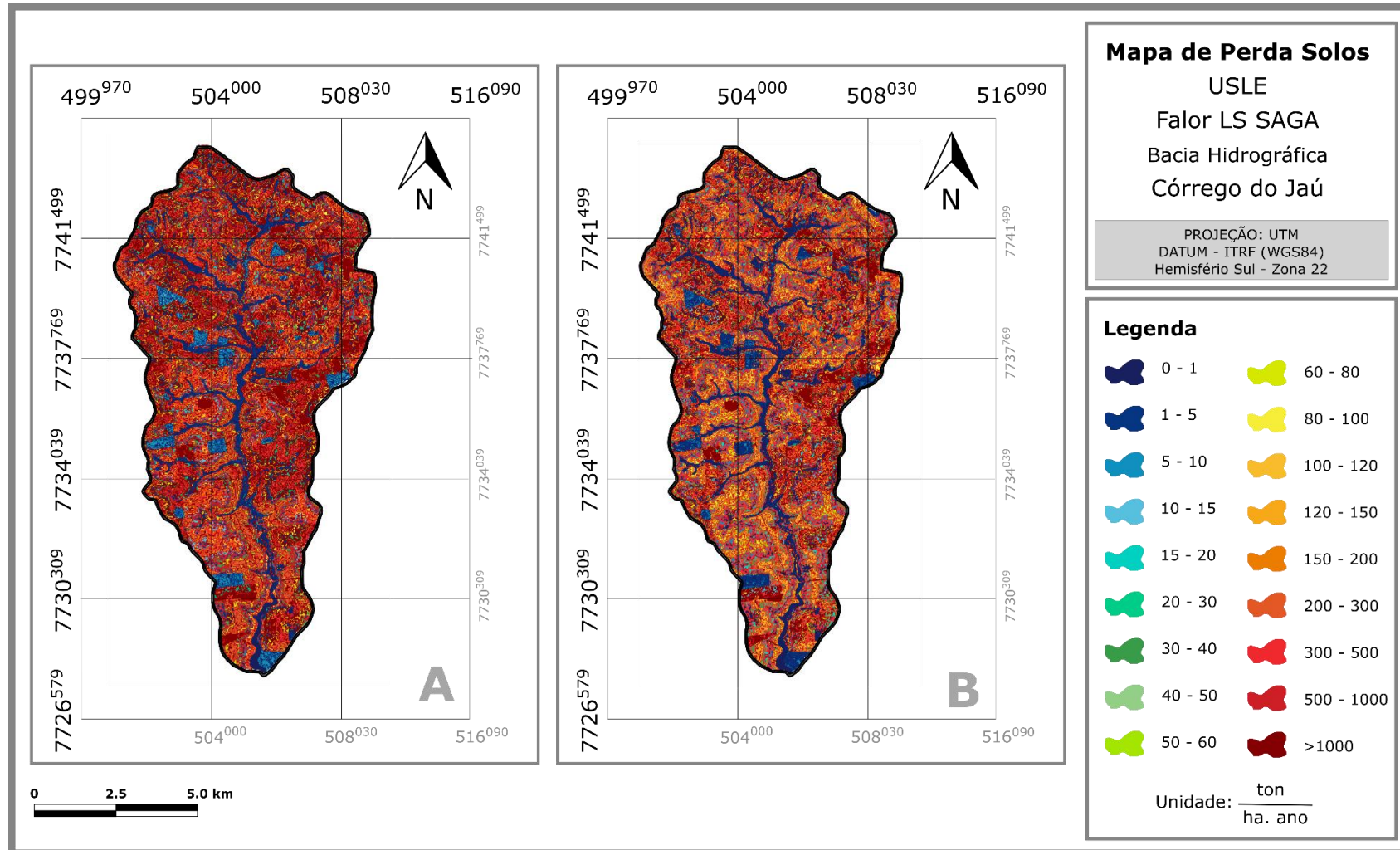
Enquanto isso, a Figura 22 mostra a distribuição da perda de solo na bacia utilizando-se o fator LS obtido de forma automatizada através do software SAGA utilizando-se o método de Boehner e Selige (2006).

Figura 21 - Perda de solo para a Bacia do Córrego do Jaú com Fator LS simplificado, sem o Fator P (A) e com o Fator P (B)



Fonte: autoria própria

Figura 22 - Perda de solo para a Bacia do Córrego do Jaú com Fator LS obtido pelo SAGA, sem o Fator P (A) e com o Fator P (B)



Fonte: autoria própria

Já inicialmente percebe-se a grande diferença entre os mapas das Figuras 21 e 22. Nos mapas gerados a partir do fator LS do programa SAGA nota-se o predomínio das classes extremas de perda de solo. É possível verificar tanto na figura 22A quanto na 23B que as áreas com menor perda de solo são aquelas cobertas por vegetação natural e vegetação de áreas úmidas (leito principal do córrego), porém devido à homogeneidade de tons avermelhados, especialmente na figura 22A, fica difícil a identificação visual das regiões da bacia com as maiores perdas de solo.

Essa condição de predominância de perdas de solo extremas também é bem notável pela Tabela 20, na qual verifica-se que mais de 50% da área da bacia encontra-se em áreas com perda de solo acima de $300 \text{ ton ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ considerando-se o fator P, e acima de $500 \text{ ton ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ sem considerá-lo.

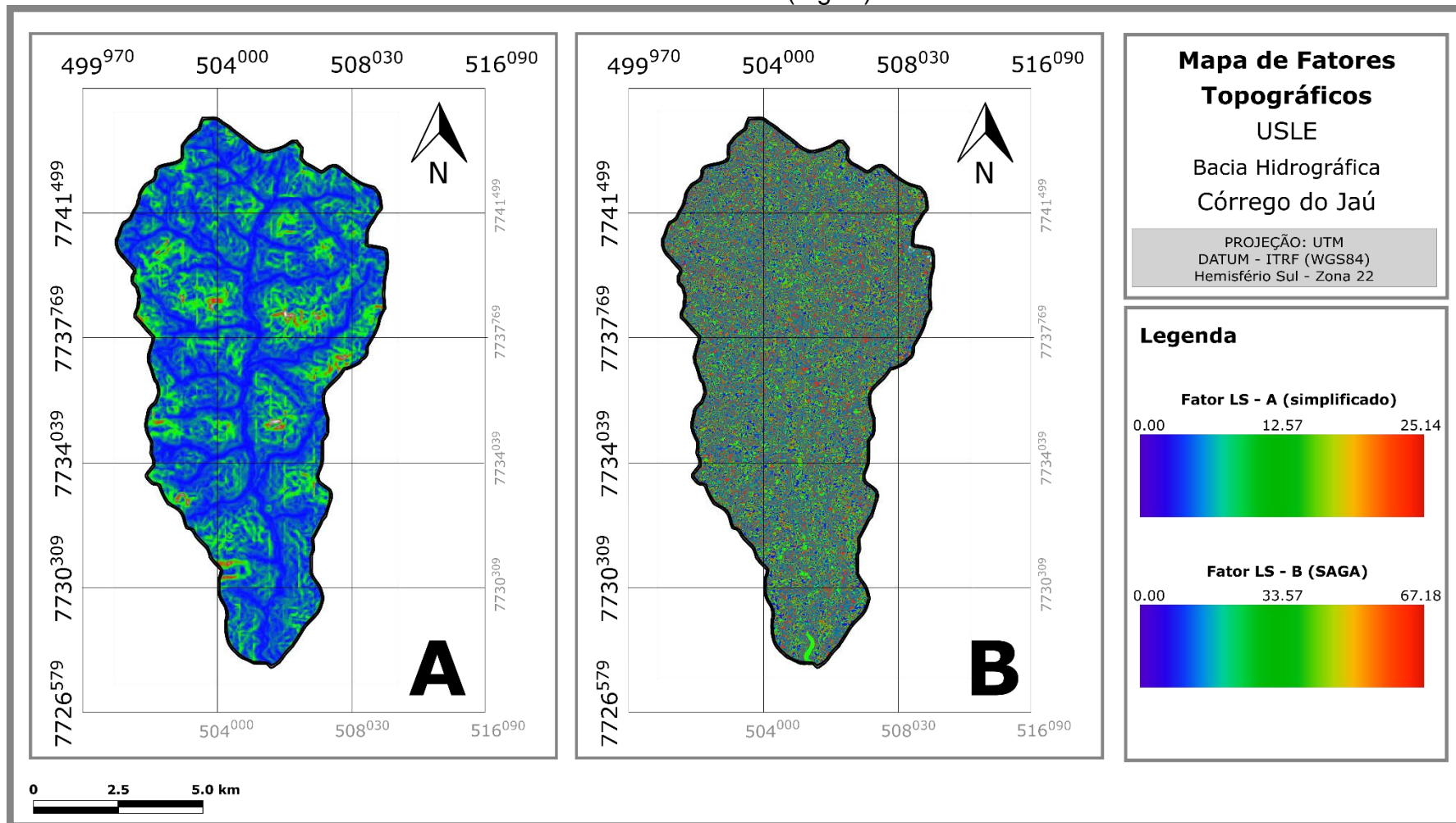
Nota-se ainda que a inclusão do fator P gerou uma mudança visual aparente entre as Figuras 22A e 22B, porém percebe-se também que esta mudança não alterou significativamente os valores de perda de solo, como mostra a Tabela 20.

Ainda quanto à diferença entre as perdas de solo resultantes dos dois tipos de estimativa do fator LS, pode-se observar que na Figura 22 a representação da distribuição da perda de solo é mais minuciosa, enquanto na Figura 21 ela é mais genérica.

A Figura 23 mostra a distribuição do fator LS a partir das duas formas de cálculo testadas.

Uma grande diferença entre os dois métodos de estimativa do referido fator é que o método simplificado considera apenas a rede de drenagem principal, com representação no banco de dados. Já o fator LS gerado pelo software SAGA não necessita da entrada de dados quanto à drenagem, utilizando o próprio modelo digital de elevação do terreno para estimar a localização dos vales e topos de encosta, onde estariam os leitos dos cursos d'água e os divisores topográficos, respectivamente.

Figura 23 - Distribuição do Fator LS para a Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú a partir do método simplificado (Fig. A) e do software SAGA (Fig. B)



Fonte: autoria própria

Essa segunda forma de estimativa parece ser mais precisa, pois considera as particularidades do terreno e não tem interferência do operador, não estando sujeita, por exemplo, a erros como a desatualização da rede de drenagem. No entanto, isso gera também uma grande variação local, o que pode ser interessante dependendo do interesse do estudo, porém para uma avaliação geral da bacia e identificação de regiões mais suscetíveis à ocorrência de processos erosivos, esse tipo de representação não é a mais indicada.

Pela análise da Figura 23A, percebe-se ainda que as áreas que possuem os maiores valores para o fator LS estão exatamente nas mesmas regiões que apresentam as maiores perdas de solo, conforme já observado na Figura 21, o que indica a relevância deste fator para o estudo.

Foi realizada ainda uma comparação entre a distribuição das perdas de solo obtidas a partir das diversas combinações da USLE e a localização dos pontos de ocorrência de processos erosivos identificados através de imagens de satélite e retirados do Mapa de Feições Erosivas. Para tanto foi utilizada a escala de classificação de perda de solo sugerida por Beskow *et al.* (2009), que divide a perda de solo em sete classes, conforme Tabela 21

Tabela 21 - Forma de classificação de Perda de Solo sugerida em outros trabalhos

Classes	Perda de Solo (t.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Baixa	0 – 2.5
Baixa a Moderada	2.5 - 5
Moderada	5 - 10
Moderada a alta	10 - 15
Alta	15 - 25
Muito alta	25 - 100
Extrema	> 100
Total	

Fonte: adaptado de Beskow *et al.* (2009)

A Tabela 22 mostra a área e porcentagem de área ocupada por cada classe de perda de solo nessa nova escala, e a quantidade e densidade de processos erosivos por classe.

A Figura 24 mostra ainda a distribuição espacial dessas classes de perda de solo e dos processos erosivos identificados na área de estudo.

Tabela 22 - Área ocupada e quantidade e densidade de processos erosivos por classe de perda de solo

Sem Fator P	Fator LS simplificado				Fator LS SAGA			
Classes	Área (km²)	% ocup	Erosões	ptos/km²	Área	% ocup	Erosões	ptos/km²
0 - 2,5	11,62	14,1%	5	0,43	10,74	13,0%	6	0,56
2,5 - 5	0,67	0,8%	1	1,49	1,38	1,7%	0	0,00
5 - 10	2,032	2,5%	6	2,95	1,94	2,4%	0	0,00
10 - 15	2,68	3,3%	3	1,12	1,023	1,2%	0	0,00
15 - 25	7,00	8,5%	8	1,14	1,04	1,3%	2	1,91
25 - 100	38,06	46,3%	44	1,16	5,27	6,4%	3	0,57
> 100	20,23	24,6%	22	1,09	60,95	74,0%	78	1,28
Total	82,3	100,0%	89	1,08	82,3	100,0%	89	1,08
Com Fator P	Fator LS simplificado				Fator LS SAGA			
Classes	Área	% ocup	Erosões	ptos/km²	Área	% ocup	Erosões	ptos/km²
0 - 2,5	12,04	14,6%	5	0,42	11,82	14,3%	6	0,51
2,5 - 5	1,79	2,2%	6	3,36	1,65	2,0%	0	0,00
5 - 10	5,40	6,6%	5	0,93	2,01	2,4%	1	0,50
10 - 15	7,26	8,8%	10	1,38	0,86	1,0%	1	1,16
15 - 25	13,87	16,9%	17	1,23	2,19	2,7%	0	0,00
25 - 100	32,04	38,9%	32	1,00	7,22	8,8%	9	1,25
> 100	9,89	12,0%	14	1,42	56,59	68,7%	72	1,27
Total	82,28	100,0%	89	0,42	82,35	100,0%	89	0,51

Fonte: autoria própria

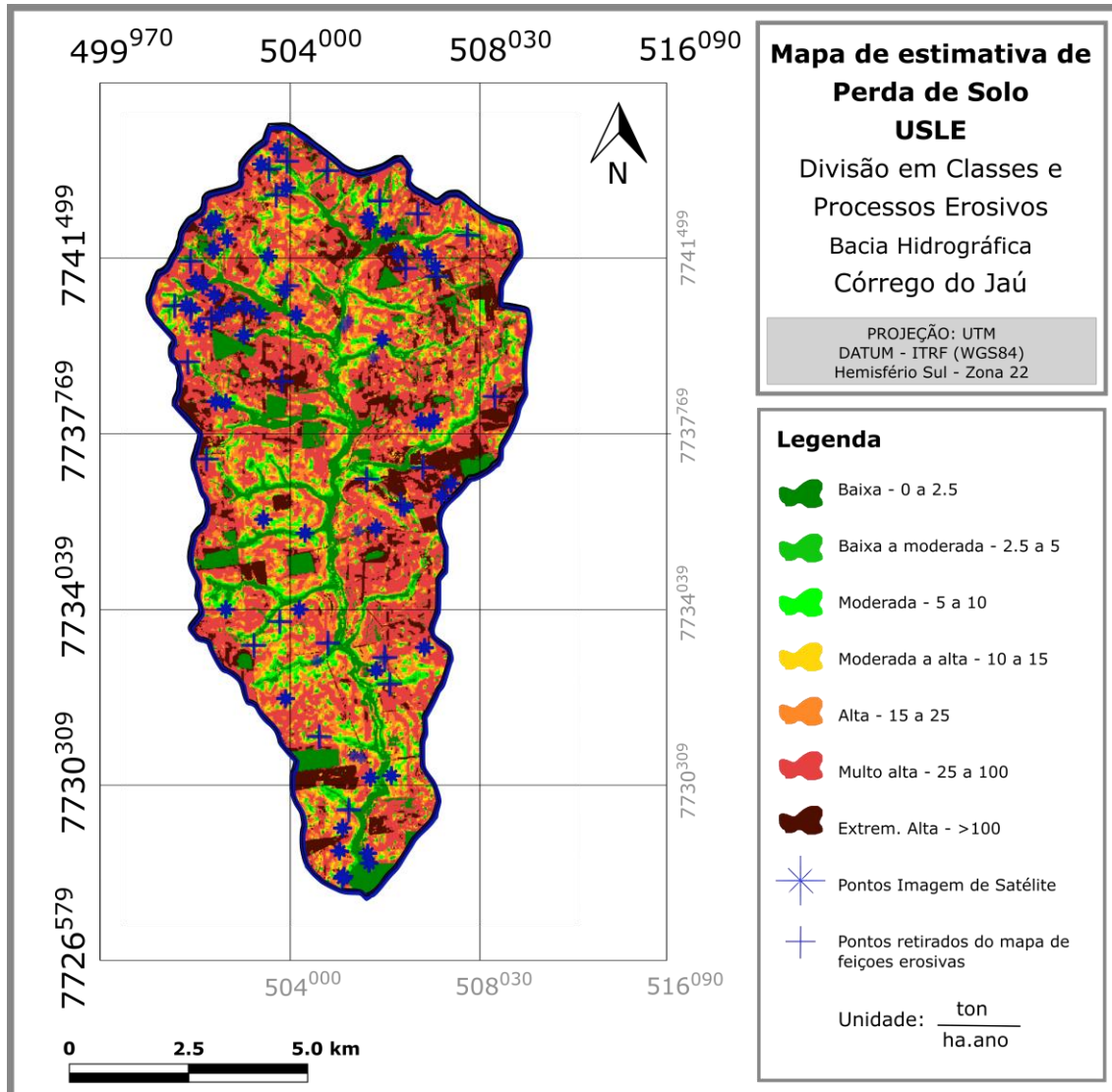
Observa-se que para o cálculo utilizando-se o Fator LS obtido do software SAGA, a maioria absoluta dos processos erosivos identificados na bacia encontra-se nas áreas com as maiores perdas de solo estimadas.

Esse fato poderia indicar a coerência do método, levando em consideração a localização dos processos erosivos, no entanto essa extrema perda de solo na maior parte da bacia e a ausência de uma relação de perdas mais distribuída na mesma gera dúvida quanto à precisão do método em representar as características reais do local de forma fiel.

Já a densidade de processos erosivos observada quando utilizado o Fator LS simplificado é mais igualmente distribuída, embora possa ser identificado um

curto padrão crescente na situação em que são desconsideradas as práticas conservacionistas.

Figura 24 - Mapa classificado de perda de solo estimada com a distribuição espacial dos processos erosivos identificados na Bacia Hidrográfica do Córrego do Jaú para a utilização do Fator LS simplificado e considerando o Fator P



Fonte: autoria própria

Apesar dessas análises, os resultados de densidade de processos erosivos podem não ser significativos o suficiente para que se possa fazer uma análise mais aprofundada e chegar a conclusões baseadas somente neles, até mesmo porque as erosões não são pontuais como sua representação gráfica. Muito pelo contrário, foram identificados diversos processos erosivos que se estendem por uma grande área, tanto do tipo laminares quanto lineares, de

forma que, na prática, essas erosões podem se estender sobre áreas com diferentes tipos de cobertura do solo ou declividade, por exemplo, enquanto sua representação sugere apenas uma única classe para cada parâmetro.

Por esse aspecto, entende-se que a análise da localização dos processos erosivos é melhor realizada através de simples análise visual, como pode ser feito com a Figura 24, onde é mostrada a distribuição de processos erosivos sobre o mapa de perda de solo utilizando-se do Fator LS simplificado e do Fator P. Apesar de não ser possível conferir exatamente sobre qual classe os pontos estão localizados através do mapa (ao menos na escala utilizada), percebe-se que a maioria das regiões de maior concentração de pontos também são as regiões com perdas de solo mais elevadas em seu entorno.

Além disso, a distribuição da área ocupada por cada classe nessa mesma situação é crescente de forma moderada, o que contribui para a percepção de que esta é a representação mais fiel da área de estudo.

Medeiros *et al.* (2016) estimaram uma perda de solo média de 30 ton ha⁻¹ano⁻¹ para todo o estado de São Paulo. Já Lino (2010) previu em seu estudo que 35% do estado de São Paulo estava sujeito a perda de solo entre 0 e 9 ton ha⁻¹ano⁻¹, 50% entre 9 e 118 ton ha⁻¹ano⁻¹, e 15% acima de 118 ton ha⁻¹ano⁻¹.

Enquanto isso, Mello, Bueno e Pereira (2006), em seu estudo de uma região com características de solo, relevo e uso e cobertura do solo parecidos com os do presente trabalho, em uma área no município de Monte Alto – SP, observaram uma área considerável com perda de solo entre 20 e 50 ton ha⁻¹ano⁻¹.

4.3 VISITA A CAMPO

A visita a campo para reconhecimento da bacia de estudo foi realizada no dia 05 de dezembro de 2018.

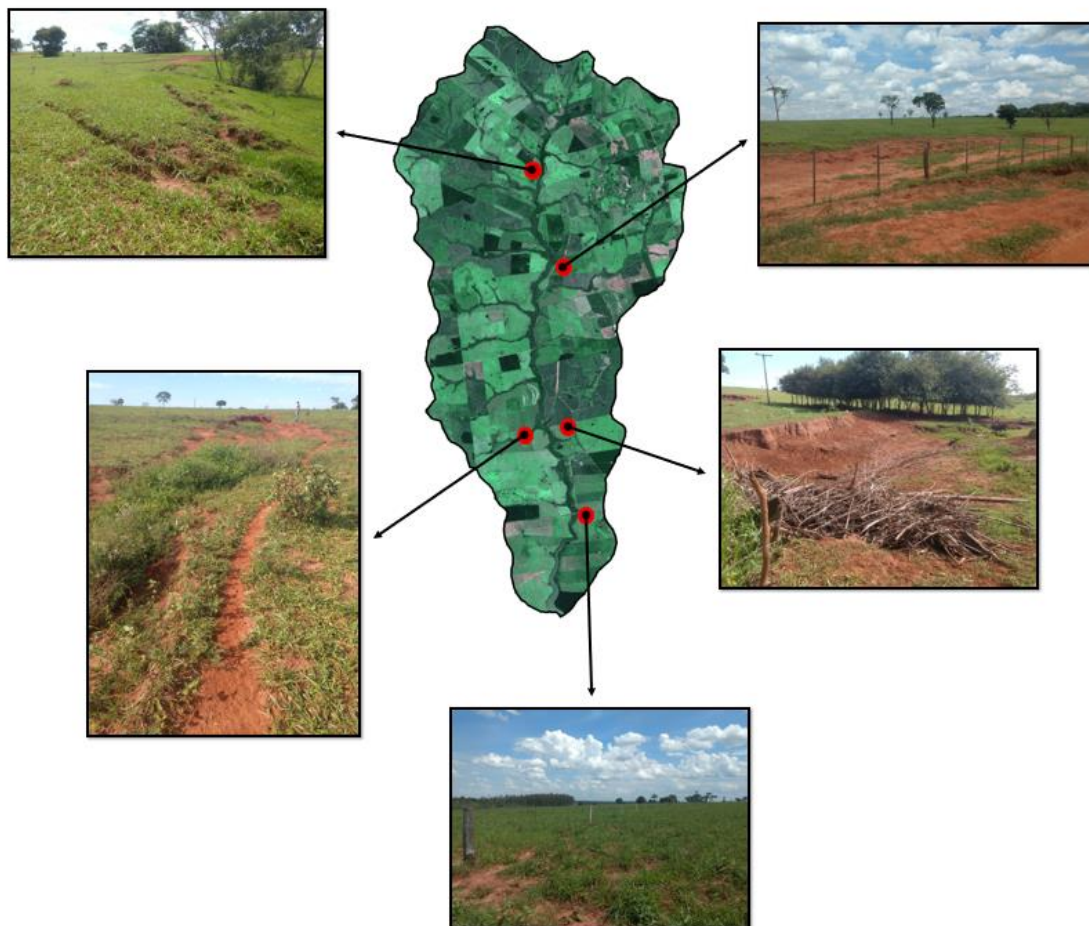
A Figura 25 mostra alguns dos processos erosivos identificados durante a visita.

Na oportunidade confirmou-se também que na maior parte das propriedades são utilizadas práticas conservacionistas, especialmente o plantio em nível.

O plantio em nível pode ser identificado inclusive em áreas de pastagem onde há presença de processos erosivos. Muitas dessas erosões puderam também ser associadas ao trajeto percorrido pelo gado para beber água ou se alimentar.

Além disso foi verificado que parte do leito principal do córrego e a maior parte dos seus afluentes é coberto por vegetação de áreas úmidas, o que corrobora com a classificação de uso e cobertura feita durante o estudo através das imagens de satélite.

Figura 25 - Exemplos de pontos inspecionados durante a visita a campo que possuíam processos erosivos em diferentes níveis



Fonte: autoria própria

São apresentadas ainda algumas fotografias da área nas Figuras 26 a 29 exemplificando as situações encontradas.

Figura 26 – Propriedade com prática conservacionista de plantio em nível



Fonte: autoria própria

Figura 27 - Margem do córrego sem proteção sendo utilizada para animais beberem água



Fonte: autoria própria

Figura 28 - Leito do Córrego do Jaú coberto por vegetação de áreas úmidas



Fonte: autoria própria

Figura 29 - Leito principal do Córrego do Jaú



Fonte: autoria própria

Sendo assim, a visita a campo foi satisfatória. Foi possível confirmar algumas das observações realizadas com base nas imagens de satélite e não foi encontrada nenhuma situação atípica que pudesse interferir no estudo.

5 CONCLUSÕES

Após análise e comparação dos métodos utilizados para avaliar o potencial de ocorrência de erosão da região de estudo foram constatadas diferenças e semelhanças entre os métodos.

Em todos os casos analisados o fator uso e cobertura do solo foi de grande importância para o resultado final, sendo evidenciada também a grande relevância do fator topográfico e declividade. Vegetação natural e solo exposto foram consideradas as coberturas de maior e menor estabilidade em todas as situações. Apesar disso, enquanto o método da Vulnerabilidade Natural à Erosão considerou a vegetação de áreas úmidas como de maior vulnerabilidade possível, a Equação Universal de Perda de Solo considerou o mesmo tipo de cobertura como extremamente estável.

Foi constatado ainda que a pastagem tem um papel muito expressivo no surgimento de processos erosivos, porém seu valor de instabilidade é sempre baixo de acordo com os métodos analisados. Isso se deve provavelmente ao fato de considerarem apenas a cobertura do solo para a estimativa de pesos, e não o estado de conservação da pastagem ou tipo de utilização, que geralmente prevê o trânsito constante de animais.

Quanto às diferenças nas classificações e mapas finais, foi notado que o método do VNE gera os mapas mais abrangentes e com as maiores aproximações, estando a maior parte da bacia de estudo em áreas consideradas de vulnerabilidades intermediárias para moderadamente vulneráveis.

Em seguida nessa ordem está o mapa gerado pela USLE utilizando-se o fator topográfico dito simplificado, que também faz grandes aproximações para sua estimativa. Há uma predominância de perdas de solo entre 20 a 50 ton.ha⁻¹ano¹, ou perda alta a muito alta, dependendo da escala utilizada.

O mapa da Equação Universal de Perda de Solo gerado a partir do fator topográfico obtido de forma automatizada pelo software SAGA utilizando-se o método de Boehner e Selige (2006) foi o que apresentou os resultados mais discrepantes tanto em relação aos outros métodos deste trabalho como de outros estudos, devido a variações locais e um extremo detalhamento deste fator para a área, o que gerou resultados de perda de solo extremamente alta para a maior parte da bacia, com predominância de valores acima de 300 ton.ha⁻¹ano¹.

Verificou-se ainda que a comparação entre os valores de perda de solo estimados pelas diferentes combinações testadas e a localização dos processos erosivos identificados na bacia é melhor realizada através de análise visual dos mapas, e não pelos resultados numéricos, devido à natureza dos processos erosivos.

Outra constatação foi a importância do fator práticas conservacionistas para o resultado final, sendo notável tanto visualmente quanto através dos resultados numéricos sua relevância.

Por fim, notou-se que o mapa que pareceu melhor caracterizar a bacia de estudo e ser mais fiel à realidade foi aquele gerado a partir da USLE utilizado o fator topográfico simplificado e considerando as práticas conservacionistas. O predomínio de valores de perda de solo entre 20 e 50 ton.ha⁻¹ano¹ condiz inclusive com a perda de solo estimada por outros trabalhos no mesmo contexto.

REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTINEZ, C.; VAN PELT, S.; MOORE-KUCERA, J.; BADDOCK, M. C.; ZOBECK, T. M. Microbiology of wind-eroded sediments: Current knowledge and future research directions. **Aeolian Research**, London, v. 18, p. 99-113, 2015.

AIELLO, A.; ADAMO, M.; CANORA, F. Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy. **Catena**, Amsterdam, v. 131, p. 174-185, 2015.

ALEXAKIS, D. D.; HADJIMITSIS, D. G.; AGAPIOU, A. Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 131, p. 108-124, 2013.

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.

AMERI, A. A.; POURGHASEMI, H. R.; CERDA, A. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 613-614, p. 1385-1400, 2018.

ANACHE, J. A. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. C. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 622-623, p. 140-151, 2018.

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

BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F.; MIOTO, C. L.; PARANHOS FILHO, A. C. Aplicação da equação universal de perda do solo (USLE) em softwares livres e Gratuitos. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 170-179, 2015.

BARBOSA, Y. B.; LORANDI, R. Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade à erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão do Pântano nos municípios de São Carlos, Analândia e Descalvado (SP). **Revista Geografia**, Londrina, v. 21, n. 1, p. 103-123, 2012.

BARROW, C. J. **Land degradation**. New York: Cambridge University Press, 1994.

BENNETT, H. H. **Soil conservation**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1939.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.

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, 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**, Goettingen, v. 115, p. 13-27, 2006.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 269-300.

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

BRIAK, H.; MOUSSADEK, R.; ABOUMARIA, K.; MRABET, R. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 4, p. 177-185, 2016.

BROOKS, E. S.; DOBRE, M.; ELLIOT, W. J.; WU, J. Q.; BOLL, J. Watershed-scale evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model in the Lake Tahoe basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 533, p. 389-402, 2016.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986.

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.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA – CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**: Aparecida d'Oeste. Campinas, 2018. Disponível em: https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_029.html. Acesso em: 19 jul. 2018.

CHAPLOT, V.; GIBOIRE, G.; MARCHAND, P.; VALENTIN, C. Dynamic modelling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. **Catena**, Amsterdam, v. 63, n. 2/3, p. 318-328, 2005.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. *In*: GUERRA, A. J. T. ; CUNHA, S. B. (eds.). **Geomorfologia**: -

uma atualização de base e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1998. 472 p.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS – CBH-SJD. **Relatório de situação dos recursos hídricos - UGRHI 18**. São José do Rio Preto: CBH-SJD, 2017. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhsjd/documentos>. Acesso em: 13 jul. 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Geologia do Estado de São Paulo**. 2006. Disponível em: http://datageo.ambiente.sp.gov.br/datageo/files/Estudos/spaulo_lito_MAPA.pdf. Acesso em: 28 jun. 2018.

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, **Geoscientific Model Development**, Goettingen, v. 8, p. 1991-2007, 2015.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS – CPTI; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Elaboração de mapa de feições erosivas urbanas e rurais da bacia do Rio São José dos Dourados**: mapa geral de pontos de erosão. Relatório Técnico nº 295/07, 2008. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhsjd/documentos>. Acesso em: 13 jul. 2018.

COUCLELIS, H. Space, time, geography. *In*: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (ed.). **Geographical information systems: principles, techniques, applications and management**. Chichester, New York: Wiley, 2005. p. 29-38.

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.

DEFERSHA, M. B.; MELESSE, A. M.; MCCLAIN, M. E. Watershed scale application of WEPP and EROSION 3D models for assessment of potential sediment source areas and runoff flux in the Mara River Basin, Kenya. **Catena**, Amsterdam, v. 95, p. 63-72, 2012.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; JETTEN, V. G.; RITSEMA, C. J. LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. *In*: KOVAR, K.; NACHTNEBEL, H. P. (eds.). **Application of geographic information systems in hydrology and water resources management**. Wallingford: IAHS, 1996. p. 395-403. IAHS Publ. 235.

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

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

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESI, F.; BARGELLINI, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 120, p. 25-36, 2012.

DU, H.; DOU, S.; DENG, X.; VUE, X.; WANG, T. Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the ningxia-inner mongolia reach of the yellow river, China. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 67, p. 117-131, 2016.

EASTMAN, J. R. Multi-criteria evaluation and GIS. *In*: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (ed.). **Geographical information systems: principles, techniques, applications and management**. Chichester, New York: Wiley, 2005. p. 493-502.

EHRlich, P. J. **Procedimentos para apoio às decisões: gestão de risco e de objetivos conflitantes**. São Paulo: FGV-EAESP, 2004. 74 p.

FONTES, A. L. As redes de drenagem. *In*: _____. **Geomorfologia fluvial e hidrografia**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2010. Aula 3. Disponível em: http://www.cesadufs.com.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15505516022012Geomorfologia_Fluvial_e_Hidrografia_aula_3.pdf. Acesso em: 20 jul. 2018.

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 International Engineering Journal**, Ouro Preto, v. 69, n. 4, p. 417-424, 2016.

FURL, C.; SHARIF, H.; JEONG, J. Analysis and simulation of large erosion events at central Texas unit source watersheds. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 527, p. 494-504, 2015.

GALETI, P. A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1984.

GAUBI, I.; CHAABANI, A.; MAMMOU, A. B.; HAMZA, M. H. A GIS-based soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). **Natural Hazards**, Dordrecht, v. 86, n. 1, p. 219-239, 2017.

GHAFFARI, H.; GORJI, M.; ARABKHEDRI, M.; ROSHANI, G. A.; HEIDARI, A.; AKHAVAN, S. Identification and prioritization of critical erosion areas based on onsite and offsite effects. **Catena**, Amsterdam, v. 156, p. 1-9, 2017.

GIMENES, F. B. Q.; AUGUSTO FILHO, O. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação

geográfica (SIG). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6564-6571.

GOMES, N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2483-2492, 2008.

GOOGLE. **Google Earth**. Versão 7.3.2. 2018. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: 16 jul. 2018.

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. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 75, n. 4, 2015.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-55.

HALECKI, W.; KRUK, E.; RYCZEK, M. Loss of topsoil and soil erosion by water in agricultural areas: A multi-criteria approach for various land use scenarios in the western carpathians using a SWAT model. **Land Use Policy**, Oxford, v. 73, p. 363-372, 2018.

IAAICH, H.; MOUSSADEK, R.; BAGHDAD, B.; MRABET, R.; DOUAIK, A.; ABDELKRIM, D.; BOUABDLI, A. Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province –Northern Morocco. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 4, n. 3, p. 159-167, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Aparecida D’Oeste**: Panorama. 2018a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/aparecida-doeste/panorama>. Acesso em: 13 jul. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Carta Topográfica**. Rio de Janeiro: Fundação IBGE. 2018b. Escala 1:50.000. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais.html>. Acesso em: 25 jan. 2018.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Relatório técnico IPT Nº 87.018-205**: Plano de bacia da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Rio São José Dos Dourados - UGRHI 18. São Paulo, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. 2018. Disponível em:

<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 15 jun. 2018.

LAL, R. **Soil erosion research methods**. 2. ed. New York: CRC Press, 1984.

- LAL, R. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 188, p. 35-40, 2019.
- LIER, Q. J.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D. C.; BLOEM, E. M.; SCHNUG, E. Runoff mapping using WEPP erosion model and GIS tools. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 31, n. 10, p. 1270-1276, 2005.
- 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**, Rio Claro, v. 35, n. 1, p. 63-76, 2016.
- LIMA, E. R. V. Erosão do solo: fatores condicionantes e modelagem matemática. **Cadernos do Logepa**, João Pessoa, v. 3, n. 1, 2003. Disponível e: <http://www.periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/logepa/article/view/10981/6166>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- LINO, J. S. **Evolução do sistema plantio direto e produção de sedimentos no Rio Grande de Sul**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- LOPES, M. S.; SALDANHA, D. L. Análise de vulnerabilidade natural à erosão como subsídio ao planejamento ambiental do oeste da bacia hidrográfica do Camaquã – RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Monte Carmelo, v. 68, n. 9, p. 1689-1708, 2016.
- LU, D.; LI, G.; VALLADARES, G. S.; BATISTELLA, M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 15, n. 5, p. 499-512, 2004.
- MACHADO, R. L.; CARVALHO, D. F.; ROUWS, J. R. C.; ALMEIDA, W. S.; OLIVEIRA, P. T. S. Multivariate analysis of erosivity indices and rainfall physical characteristics associated with rainfall patterns in Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v41/0100-0683-rbcs-18069657rbcs20160378.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- MAHMOODABADI, M.; CERDA, A. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 204/205, p. 75-83, 2013.
- MARTINI, L. C. P.; UBERTI, A. A. A.; SCHEIBE, L. F.; COMIN, J. J.; OLIVEIRA, M. A. T. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Geologia USP - Serie Científica**, São Paulo, v. 6, n. 1, 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 São Paulo, Brazil. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 40, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v40/1806-9657-rbcs-40-e0150497.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 315-322, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a10>. Acesso em: 17 abr. 2019.

MOREIRA, M. C.; CECÍLIO, R. A.; PINTO, F. A. C.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1069-1076, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v30n6/a16v30n6.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.

NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A Process-based soil erosion model for usda-water erosion prediction project technology. **Transactions of the ASAE**, [s.l.] v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.

NEARING, M. A.; XIE Y.; LIU, B.; YE, Y. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 5, n. 2, p. 77-84, 2017.

NEKHAY, O.; ARRIAZA, M.; BOERBOOM, L. Evaluation of soil erosion risk using analytic network process and GIS: a case study from Spanish mountain olive plantations. **Journal of Environmental Management**, London, v. 90, n. 10, p. 3091-3104, 2009.

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 Conservation Research**, Beijing, v. 4, n. 3, p. 199-206, 2016.

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, J. A.; DOMINGUEZ, J. M. L.; NEARING, M. A.; OLIVEIRA, P. T. S. A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the Universal Soil Loss Equation: GISus-M. **Transactions of the ASABE**, [s.l.], v. 31, n. 6, p. 907-917, 2015.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Processo analítico hierárquico aplicado a vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, Rio Claro, v. 28, n. 4, p. 417-424, 2009.

OZCAN, A. U.; ERPUL, G.; BASARAN, M.; ERDOGAN, H. E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Cankırı, Turkey. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 53, n. 8, p. 1731-1741, 2008.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, Amsterdam, v. 147, p. 595-620, 2016.

PHAM, T. G.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: central Vietnam. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 6, n. 2, p. 99-110, 2018.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

RAHMAN, M. R.; SHI, Z. H.; CHONGFA, C. Soil erosion hazard evaluation—An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 220, p. 1724-1734, 2009.

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). Washington: USDA, 1997. Agriculture Handbook, n. 703.

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

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

RUHE, R. V. **Quaternary landscapes in Iowa**. Ames: Iowa State University Press, 1969.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Maryland Heights, v. 15, n. 3, p. 234-28, 1977.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção de processos erosivos. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-267.

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

SENA, J. N. **O uso de sistema de informação geográfica na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de suscetibilidade à erosão**.

2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98103/sena_jn_me_ilha.pdf?sequence=1. Acesso em: 17 abr. 2019.

SHARRATT, B. S.; TATARKO, J.; ABATZOGLOU, J. T.; FOX, F. A.; HUGGINS, D. Implications of climate change on wind erosion of agricultural lands in the Columbia plateau. **Weather and Climate Extremes**, Amsterdam, v. 10, p. 20-31, 2015.

SHEN, Z.; GONG, Y.; LI, Y.; LIU, R. Analysis and modeling of soil conservation measures in the Three Gorges Reservoir Area in China. **Catena**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 104-112, 2010.

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

SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 32, p. 141-148, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n2/a06v15n2.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.

SILVA, L. C. N. S.; LUCHIARI, A. Estimativa de perda de solos por erosão laminar na bacia hidrográfica do córrego Baguaçu-SP. **Revista do Departamento de Geografia USP**, São Paulo, v. 32, p. 15-28, 2016.

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 informação geográfica. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, Patos de Minas, v. 7, p. 66-78, 2016.

SOTIROPOULOU, A. M.; ALEXANDRIDIS, T.; BILAS, G.; KARAPETSAS, N.; TZELLOU, A.; SILLEOS, N.; MISOPOLINOS. A user friendly GIS model for the estimation of erosion risk in agricultural land using the USLE. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE, FOOD AND ENVIRONMENT (HAICTA), 5, 2011, Skiathos. **Proceedings [...]**. Skiathos: HAICTA, 2011, p. 798-801.

STARKLOFF, T. STOLTE, J. Applied comparison of the erosion risk models EROSION 3D and LISEM for a small catchment in Norway. **Catena**, Amsterdam, v. 118, p. 154-167, 2014.

TADESSE, L.; SURYABHAGAVAN, K. V.; SRIDHAR, G.; LEGESSE, G. Land use and land cover changes and soil erosion in Yezat Watershed, North Western Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 5, n. 2, p. 85-94, 2017.

TAMENE, L.; ADIMASSU, Z.; AYNEKULU, E.; YAEKOB, T. Estimating landscape susceptibility to soil erosion using a GIS-based approach in Northern Ethiopia. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 5, n. 3, p. 221-230, 2017.

TOUBAL, A. K.; ACHITE, M.; OUIILLON, S.; DEHNI, A. Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 190, n. 4, 2018.

TRICART, J. **Ecodinâmica**: recursos naturais e meio ambiente. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977. 91 p.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society American Journal**, New York, v. 263, n. 7, p. 616-27, 1965.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. **Produção e conservação de forragens**: PARTE I. Pirassununga, 2016. Disponível em: http://sites.usp.br/gefepfzea/wp-content/uploads/sites/134/2014/05/Apostila-PCF_MV.pdf. Acesso em: 20 jul. 2018.

UZEIKA, T.; MARTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 557-565, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v36n2/a25v36n2.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2019.

VALERIANO, M. M. **Topodata**: Guia para utilização de dados geomorfológicos Locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 75 p.

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

VALLEBONA, C.; MANTINO, A.; BONARI, E. Exploring the potential of perennial crops in reducing soil erosion: a GIS-based scenario analysis in southern Tuscany, Italy. **Applied Geography**, Oxford, v. 66, p. 119-131, 2016.

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

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

ZHANG, S.; FAN, W.; LI, Y.; YI, Y. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 574, p. 34-45, 2017.