

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

LETICIA TONDATO ARANTES

**LIMIARES TOPOGRÁFICOS DE PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO RIO
BONITO (SP) OBTIDOS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DE
DADOS DE RADAR (PALSAR/ALOS)**

Ilha Solteira
2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LETICIA TONDATO ARANTES

**LIMIARES TOPOGRÁFICOS DE PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO RIO
BONITO (SP) OBTIDOS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DE
DADOS DE RADAR (PALSAR/ALOS)**

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

Área de concentração: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Lollo.

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A662l Arantes, Leticia Tondato.
Limiares topográficos de processos erosivos na Bacia do Rio Bonito (SP)
obtidos a partir de modelo digital de elevação de dados de radar
(PALSAR/ALOS) / Leticia Tondato Arantes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
96 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 linear. 2. Geoprocessamento. 3. Limiares de erosão. 4. MDE. 5.
SIG.


Raiane da Silva Santos

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9599



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: LIMIARES TOPOGRÁFICOS DE PROCESSOS EROSIVOS NA BACIA DO RIO BONITO (SP) OBTIDOS A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DE DADOS DE RADAR

AUTORA: LETICIA TONDATO ARANTES

ORIENTADOR: JOSE AUGUSTO DE LOLLO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre 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. CARLOS WILMER COSTA
Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Ilha Solteira, 11 de julho de 2019

A Deus pela minha existência, à minha mãe,
por todo o amor e apoio durante este
trabalho de dissertação.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial à minha mãe Cristina, pelo amor, exemplo, caráter e pelo esforço incondicional para que eu continuasse meus estudos, e pelo apoio recebido durante minha trajetória;

Ao meu orientador, Prof. Doutor José Augusto de Lollo, pela oportunidade, paciência e pelo conhecimento a mim transmitido, que foram fundamentais para realizar e prosseguir este estudo. Saliento o apoio prestado e a forma interessada como acompanhou a realização deste trabalho;

Ao meu irmão Bruno, que sempre esteve comigo ao longo dessa caminhada;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por proporcionar as condições para a realização deste trabalho;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UNESP, por participarem da minha formação profissional e pessoal;

Finalmente, agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro.

A todos, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

A erosão é um fenômeno complexo, uma vez que envolve a ação direta ou indireta de diversos fatores, tais como tipos de solos, clima, vegetação, declividade e ações antrópicas. O estudo acerca da dinâmica, agentes desencadeadores e fatores condicionantes é uma importante ferramenta para uma tomada de decisão. A proposição de índices que indicam o limiar crítico para determinar a ocorrência de processos erosivos, é uma das vertentes dos estudos acerca de processos erosivos, cuja pressupõe-se uma relação entre a declividade (S) e área de contribuição (A), que condiciona os processos de erosão. Considerando os avanços na geração dos produtos de Sensoriamento Remoto, este trabalho objetivou realizar um estudo sobre o desencadeamento das erosões lineares, no qual propõe a avaliação da empregabilidade do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado por meio de imagem de radar interferométrico (ALOS/Palsar) para obtenção dos parâmetros topográficos da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito, inserida no município de Descalvado e Porto Ferreira no estado de São Paulo. Com isso o MDE, o mapa de declividades e direção de fluxo foram elaborados em ambiente SIG, com pixels de saída de 2m, possibilitando obter os valores de A versus S, utilizando o algoritmo *D-Infinity* para o processamento dos dados hidrológicos. Os valores obtidos foram representados em um gráfico, permitindo identificar a declividade mínima para a ocorrência de um processo erosivo, bem como estabelecer de forma empírica o limiar topográfico. O índice obtido nesse trabalho a partir da análise foi $S = 0.0333A^{-0,039}$, demonstra tratar-se de uma região na qual o desencadeamento de processos erosivos pode ser dar com baixos valores de declividade do terreno, e que área de estudo é altamente susceptível a ocorrência de processos erosivos. Por fim, a obtenção dos parâmetros A x S com o uso do SIG pode ser realizada de forma automática, favorecendo posteriores análises de forma integrada com os diferentes fatores condicionantes de processos erosivos.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão linear. Geoprocessamento. Limiares de erosão. MDE. SIG.

ABSTRACT

Erosion is a complex phenomenon as it involves the direct or indirect action of various factors such as soil types, climate, vegetation, slope and anthropic actions. The study about dynamics, triggering agents and conditioning factors is an important tool for decision making. The proposition of indices that indicate the critical threshold to determine the occurrence of erosive processes is one of the strands of studies on erosive processes, whose assumption is a relationship between slope (S) and contribution area (A), which conditions the erosion processes. Considering the advances in the generation of Remote Sensing products, this work aimed to conduct a study on the triggering of linear erosions, which proposes the evaluation of the employability of the Digital Elevation Model (MDE) generated by interferometric radar imaging (ALOS / Palsar) to obtain the topographic parameters of the Bonito River Watershed, inserted in the municipality of Descalvado and Porto Ferreira in the state of São Paulo. With this the MDE, the slope map and flow direction were elaborated in GIS environment, with 2m output pixels, allowing to obtain the values of A versus S, using the D-Infinity algorithm for the hydrological data processing. The values obtained were represented in a graph, allowing to identify the minimum slope for the occurrence of an erosive process, as well as to establish empirically the topographic threshold. The index obtained in this work from the analysis was $S = 0.0333A - 0.039$, demonstrating that this is a region in which the onset of erosive processes may occur with low slope values, and which area of study is highly susceptible. the occurrence of erosive processes. Finally, the obtaining of the parameters A x S with the use of GIS can be performed automatically, favoring further analyzes in an integrated manner with the different conditioning factors of erosive processes.

KEYWORDS: Linear erosion. Geoprocessing. Erosion thresholds. MDE. GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma dos métodos de avaliação de erosão hídrica.	32
Figura 2 - Gráfico com os limiares do índice I e II representados.	40
Figura 3- Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito e os registros de processos erosivos.....	43
Figura 4 - Índices pluviométricos médios do período de 1990 a 2002.....	45
Figura 5 - Balanço hídrico mensal de Descalvado.	45
Figura 6- Mapa de materiais inconsolidados na bacia do Rio Bonito.	48
Figura 7 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito.....	52
Figura 8 - Fluxograma metodológico das atividades.	54
Figura 9– Etapas para a elaboração do mapa de área de contribuição.....	60
Figura 10- Processamento para elaboração da carta de zoneamento.....	63
Figura 11- Mapa de documentação da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito.	64
Figura 12 - Modelo Digital de Elevação da BHRB.	67
Figura 13- Mapa de declividade da BHRB.	69
Figura 14 - Mapa de Fluxo Acumulado da BHRB.	71
Figura 15 - Gráfico SxA da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito.	73
Figura 16– Frequência da declividade das feições presentes na BHRB.	74
Figura 17- Carta de zoneamento de áreas críticas de processos erosivos.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados das feições erosivas cadastradas pelo IPT para a BHRB.	55
Tabela 2 - Dados e características das erosões mostradas no Mapa de Feições Erosivas	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Fatores condicionantes do processo erosivo.....	28
Quadro 2 - Métodos de avaliação de erosão hídrica.....	29
Quadro 3 - Valores dos coeficientes de regressão (“a” e “-b”) em diversos estudos realizados no mundo.	38
Quadro 4 - Dados e métodos utilizados na análise de processos erosivos.....	39
Quadro 5 - Unidades geomorfológicas ocorrentes na bacia do Rio Bonito.....	46
Quadro 6 -Unidades do mapa de materiais inconsolidados.	49
Quadro 7 - Classes e descrição dos solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Bonito.	51
Quadro 8- Definição das classes de declividade em porcentagem variando em função das características do local.	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Classes de uso e cobertura do solo e classificação de suscetibilidade à erosão. ...	75
Gráfico 2 – Porcentagem para cada classe de materiais inconsolidados.	77
Gráfico 3 – Ocorrência de processos erosivos considerando a pedologia da BHRB.	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área de Contribuição
BHRB	Bacia Hidrográfica do Rio Bonito
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
D-Infinity	Método da Direção de Fluxo Múltiplo
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighted
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil
MDE	Modelo Digital de Elevação
PIB	Produto Interno Bruto
R^2	Coeficiente de determinação
S	Declividade média
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Mogi Guaçu
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.1.1	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	EROSÃO DOS SOLOS	18
2.1.1	Definição	18
2.1.2	Agentes erosivos	19
2.1.2.1	<i>Eólica.....</i>	19
2.1.2.2	<i>Glacial</i>	20
2.1.2.3	<i>Hídrica.....</i>	20
2.1.3	Tipos de processos erosivos	21
2.1.3.1	<i>Laminar</i>	21
2.1.3.2	<i>Linear</i>	22
2.1.3.3	<i>Ravina.....</i>	22
2.1.3.4	<i>Voçoroca.....</i>	22
2.2	FATORES QUE INTERFEREM NA EROSÃO DO SOLO	23
2.2.1	Cobertura vegetal.....	23
2.2.2	Tipo de solo.....	24
2.2.3	Clima.....	25
2.2.4	Topografia	26
2.2.5	Ações Antrópicas.....	27
2.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	29
2.3.1	Método Qualitativo.....	29
2.3.2	Método Quantitativo	30
2.3.2.1	<i>Avaliação Direta</i>	30
2.3.2.2	<i>Avaliação Indireta.....</i>	30
2.4	GEOPROCESSAMENTO.....	32
2.4.1	Sistema de Informação Geográfica.....	33
2.4.2	Modelo Digital de Elevação.....	34
2.4.3	Aspectos Hidrológicos	35
2.5	BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO	35

2.6	ÍNDICES QUE RELACIONAM ÁREA (A) <i>VERSUS</i> DECLIVIDADE (S)	37
3	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	42
3.1.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
3.2	CLIMA E VEGETAÇÃO	44
3.3	GEOMORFOLOGIA	45
3.4	GEOLOGIA	47
3.5	PEDOLOGIA.....	50
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	53
4.1	ETAPA1: PROCEDIMENTOS PREMILIMINARES	53
4.1.1	Definição da área de estudo	53
4.1.2	Revisão Bibliográfica.....	53
4.2	ETAPA 2: COMPILAÇÃO DE DADOS	53
4.2.1	Registro de processos erosivos urbanos e rurais	55
4.2.2	Espacialização dos dados	57
4.2.3	Imagem de satélite.....	58
4.3	ETAPA 3: PRÉ-PROCESSAMENTO EM SIG	58
4.3.1	Correção da Altitude Inserida nos Pixels	58
4.3.2	Reamostragem da Resolução Espacial	59
4.2	ETAPA 4: GERAÇÃO DO ÍNDICE SXA E ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BHRB.....	60
4.2.2.1	Área de contribuição	60
4.2.2.2	Carta de declividade	61
4.2.2.3	Relação entre Declividade (S) versus Área de Contribuição (A)	62
4.2.3	Zoneamento de áreas críticas de processos erosivos	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	IVENTÁRIO DAS FEIÇÕES EROSIVAS	64
5.2	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO.....	66
5.3	CARTA DE DECLIVIDADE	68
5.4	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	69
5.5	GERAÇÃO DOS ÍNDICES S x A	72
5.6	RELAÇÃO DOS ÍNDICES COM OS ATRIBUTOS AMBIENTAIS DA BHRB ...	74

5.7	ZONEAMENTO DE ÁREAS DE OCORRÊNCIA DE EROSÕES COM BASE NOS LIMIARES TOPOGRÁFICOS.....	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo representa um problema de crescente preocupação, embora seja um dos fenômenos naturais mais estudados, ainda é pouco compreendida, especialmente no que se refere à sua previsão, tanto na sua distribuição espacial e temporal. Tal dificuldade, dentre outros motivos, possui relação intrínseca com as diferentes interações dos fatores condicionantes, os vários mecanismos de ruptura dos solos, as características de transporte, além das intervenções antrópicas, cada vez mais frequentes (ZANATTA *et al.*, 2017).

A questão da previsão e caracterização dos terrenos que podem vir a sofrer com processos erosivos vem assumindo importância crescente na literatura geomorfológica e geotécnica. No entanto, há diferentes concepções do problema e diversas formas de investigação (FERNANDES, 2001). São vários os fatores condicionantes que deflagram os processos erosivos, tais como as condições climáticas, características hidrológicas, geológicas, pedológicas, a cobertura vegetal, relevo e as atividades antrópicas (RUBIRA; MELO; OLIVEIRA, 2016).

Conforme Neves e Pejon (2017) as interações existentes entre os fatores condicionantes devem ser levados em consideração para uma avaliação adequada. Assim sendo, vários trabalhos têm adotado a análise morfométrica das feições erosivas, com a finalidade em estabelecer um limiar crítico (*threshold*) que condicione o desencadeamento das erosões (NEVES; PEJON, 2017).

Uma relação encontrada na literatura diz respeito à relação entre a área de contribuição (A) e declividade média (S) que condiciona o escoamento superficial necessário para dar início a erosão (ARAÚJO, 2011). Tal modelo proposto e descrito por Patton e Schumm (1975) e Montgomery e Dietrich (1988) define uma equação para representar o limiar crítico para o desencadeamento das erosões, baseado na relação entre a área de contribuição (A) e declividade (S), possibilitando obter um indicador do limiar crítico para o desencadeamento de canais, de modo que essa relação permita compreender as mudanças na paisagem.

São várias as formas de obtenção dos parâmetros morfométricos (A *versus* S) como fotografias aéreas, mapas topográficos, modelo digital de elevação, levantamento de campo e por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG).

No Brasil, a fonte de dados mais comum para a geração dos MDEs são as curvas de nível e, de forma suplementar, a hidrografia e os pontos de elevação obtidos a partir dos mapas topográficos (CHAGAS *et al.*, 2010).

No entanto, apesar dos mapas topográficos possuírem uma rica fonte informações de dados altimétricos para a geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), muitas vezes os dados disponíveis não correspondem à escala adequada para a geração do MDE na área de estudo, além disso, outra problemática é em função do formato em que esses dados são disponibilizados ao acesso público, sendo necessário a extração dessas informações de forma manual, isto é, efetivar-se a digitalização das curvas de nível, e consequentemente, tornando o processo de extração de informações hidrológicas e geomorfométricas um processo lento e dispendioso.

Uma tecnologia que surgiu e possibilitou a aquisição dessas variáveis são os sistemas de sensores ativos, como o radar, que possibilita a geração do MDE, em um período de tempo curto, de forma mais simples, e permite posteriormente, a obtenção dos parâmetros da área de contribuição e declividade, para representação do limiar topográfico.

Nesta perspectiva, as geotecnologias que se utilizam de modelos matemáticos e *softwares* computacionais para o tratamento de informações geográficas, composta por técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) e SIG, são importantes ferramentas para obtenção de atributos topográficos.

Dentre estes métodos destaca-se o uso do SIG que permite realizar o processamento automático e integração de dados espaciais em uma única base de dados. A integração do SR e dos SIGs, se mostra imprescindível, na aquisição de parâmetros topográficos para o desenvolvimento de modelos de simulação, processamento de dados, gestão e monitoramento ambiental das bacias hidrográficas, possibilitando desenvolver uma análise integrada de variáveis relacionadas ao meio físico, de forma simplificada e rápida.

A seleção da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito (BHRB), no qual foi aplicado o método, se deve aos diversos estudos que foram desenvolvidos na área em questão, nos quais constataram tratar-se de uma área intensamente afetada pelos processos erosivos, além disso, possui um banco de dados que forneceram subsídios para a aplicação do modelo a ser desenvolvido. Contudo, nenhum dos estudos anteriores estabeleceu um limiar crítico para o desencadeamento das erosões, justificando assim, a importância de determinar-se o limiar crítico para ocorrência de processos erosivos.

Desta forma, os resultados obtidos poderão indicar as áreas que possuem maior predisposição para a ocorrência de processos erosivos, deste modo, auxiliar os estudos pertinentes à erosão, seu controle e prevenção, além de fornecer informações para os gestores ambientais e para o planejamento territorial na área, evitando os problemas decorrentes da degradação ambiental. Por fim, espera-se que os dados desta pesquisa possam ser

extrapolados para outras regiões do Brasil com características geológicas e geomorfológicas semelhantes, onde o ravinamento e o voçorçamento normalmente se constitui um dos mais graves problemas ambientais.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho busca determinar o limiar crítico para o desencadeamento das erosões lineares na Bacia do Rio Bonito, a partir da relação entre área de contribuição (A) e declividade (S), determinadas com o auxílio do geoprocessamento.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a aplicação de usos de imagens de radar (ALOS-PALSAR) na obtenção dos parâmetros A e S, para a representação do limiar topográfico;
- Representar espacialmente os limiares críticos obtidos, por meio da carta de zoneamento de áreas prováveis de ocorrência de erosão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EROSÃO DOS SOLOS

Embora a erosão seja um processo natural, ela pode constituir-se em um tipo de processo de degradação do solo, a partir do momento em que a taxa de perda de solo passa a ser superior à taxa de formação do solo, ocasionando a quebra de equilíbrio natural entre a morfogênese e a pedogênese (MULLAN, 2013).

Para Alewell *et al.* (2014), a erosão do solo é provavelmente o maior degradador da qualidade dos solos, já que sua perda por erosão, na maioria das vezes não é substituída por processos naturais de intemperismo dentro de um período de vida humana.

2.1.1 Definição

Erosão, do latim *erodere*, que significa erodir, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1986), é o processo pelo qual há remoção de fragmentos do solo e partículas de rochas de um local e sua deposição em outros locais, pela ação dos agentes erosivos.

Weill e Pires Neto (2007), por sua vez, conceitua a erosão como um processo natural, muito difícil de ser evitado e controlado, podendo evoluir de forma fácil em virtude das ações antrópicas. Resultando na deterioração da superfície do solo, acompanhada da remoção das partículas constituintes do solo em partes individuais ou até mesmo em volumes inteiros.

A erosão dos solos é considerada um dos maiores riscos naturais, decorrente dos danos naturais, econômicos e sociais que provoca. A erosão pode ser definida como um conjunto de processos que acarretam a desagregação, desgaste, transporte e deposição das partículas do solo, subsolo e materiais rochosos, decorrente da ação dos agentes erosivos como a água, vento e gelo (VILAR; PRANDI, 1993; JACINTHO *et al.*, 2006).

Os processos erosivos podem ser classificados em dois tipos, em função de sua intensidade. Diferindo-se, entre a erosão geológica ou natural, a qual é oriunda de fenômenos naturais, sem que haja a interação do ser humano, logo sendo benéfica para o processo de formação do solo, e a erosão acelerada ou antrópica, que por sua vez ocorre em uma maior intensidade, implicando no rompimento do equilíbrio do meio (CARVALHO, 2006).

De acordo com Favaretto e Dieckow (2007), a erosão geológica ocorre sobre longos períodos de tempo, sendo motivada apenas por fatores naturais, sem a interferência do ser humano, constituindo em um processo essencial para a formação do relevo da superfície terrestre. Já a erosão acelerada do solo, também chamada de erosão antrópica, atua de forma mais rápida, isto é, por períodos de tempo relativamente curtos, sendo definida como o aumento da taxa de erosão geológica, em decorrência da quebra do equilíbrio do meio ambiente pelas atividades humanas, acelerando o processo de erosão e o aumento nas produções de sedimentos.

Portanto, pode-se dizer que a erosão é um processo complexo, uma vez que sofre influência de diferentes fatores de forma direta e indireta, tais como as características geológicas e geomorfológicas, assim com o tipo de solo, cobertura vegetal, clima, precipitação e também das ações antropogênicas que alteram as condições naturais (OLIVEIRA; SANTOS; ARAUJO, 2018).

2.1.2 Agentes erosivos

Os principais processos de erosão do solo podem ser agrupados em categorias amplas, que são descritas separadamente, no entanto, qualquer um deles pode ocorrer na mesma localidade, seja em combinação ou em diferentes épocas do ano. Galetti (1979), classifica a erosão quanto ao seu agente causador: água, vento e geleiras, responsáveis pelas fases de desagregação, transporte e deposição dos materiais. Sendo que a água e o vento são os principais agentes que fornecem energia ao processo erosivo, dando origem a erosão hídrica e a erosão eólica. A erosão hídrica quando associada a erosão eólica, assume um papel de maior relevância a nível global.

2.1.2.1 Eólica

Esta erosão é provocada pela ação do vento, sendo mais intensa quanto maior a sua velocidade e área livre de vegetação e obstáculos. Esse tipo de erosão, normalmente, ocorre em regiões planas, que possuem o clima árido ou semiárido ou em regiões em que o período chuvoso é concentrado em uma determinada época do ano, com curta duração (SILVA, 2009).

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2008), entre os principais fatores que afetam a erosão eólica estão o clima, o solo e a vegetação. No que se refere ao solo, o fator de maior relevância é umidade, já que um solo parcialmente seco está sujeito à erosão eólica. Com relação ao clima, a precipitação, vento, temperatura, umidade e densidade do ar, são variáveis importantes neste processo.

2.1.2.2 *Glacial*

A erosão glacial é um processo natural, restrito a áreas de alta altitude e climas frios. Ocorre quando a água no solo inicialmente congela, expande-se e depois funde, permitindo que as partículas soltas do solo sejam levadas no escoamento da água fundida (VERDOODT, 2012).

2.1.2.3 *Hídrica*

A erosão hídrica é uma das principais formas de degradação do solo, acarretando em prejuízos de ordem ambiental, econômica e social. O processo da erosão hídrica é originado pela ação da chuva (agente ativo) sobre o solo (agente passivo), que são capazes de derivar o arranque das partículas, por meio do impacto de suas gotas que caem sobre o solo com energia e velocidade que variam de acordo com o diâmetro e com as forças de escoamento (ZUQUETTE; CARVALHO; YAMANOUTH, 2007).

Carvalho *et al* (2002), considera a erosão como um processo que envolve três fases básicas, podendo ocorrer de forma individual ou em conjunto, quais sejam: desagregação, transporte e deposição das partículas do solo. A primeira fase da erosão, conhecida como desagregação, trata-se do processo de desprendimento das partículas de solo, em que uma vez desprendidas, podem permanecer próximas ao agregado ou serem transportadas.

A desagregação consiste no processo de separação das partículas da massa de solo, sendo causada, basicamente, pela ação das gotas da chuva, quanto pela ação cisalhante do escoamento superficial. O transporte consiste no arraste das partículas desagregadas, que ocorre pela ação do vento, e em maior escala, pela água. Na medida em que a intensidade da chuva passa a ser superior que a capacidade de infiltração do solo, inicia-se o escoamento superficial, transportando os sedimentos. Por fim, no estágio final, quando o escoamento superficial, não possui a capacidade de transportar o material sólido em suspensão, ocorre o

processo de deposição das partículas de solo em algum local (PRUSKI; GRIEBELER; SILVA, 2009).

O processo de erosão hídrica pode ser afetado por alguns elementos e possui uma elevada variação de local para local, em função das variáveis envolvidas no processo, isto é, o tipo de solo, comprimento e inclinação do declive, cobertura vegetal, uso e manejo do solo e o regime de chuva (BAGATINI, 2011).

2.1.3 Tipos de processos erosivos

Segundo Carvalho (2006), a erosão laminar, os sulcos, ravinas e voçorocas constituem as feições erosivas mais comuns. Oliveira (1999), afirma que o primeiro estágio é a erosão laminar, que leva a formação de sulcos rasos e profundos, sendo representando por pequenos canais. Não havendo medidas mitigadoras, os pequenos canais podem evoluir dando origem a canais maiores, denominadas ravinas. Ao evoluir mais, as ravinas podem admitir grandes dimensões de vários metros de largura, extensão e se aprofundar até atingir o nível de base local. A partir deste estágio, ocorre o desenvolvimento da voçoroca, evoluindo de forma rápida e complexa.

2.1.3.1 Laminar

A erosão laminar, na maioria dos casos, é o primeiro estágio no desencadeamento de processos erosivos, e representa os processos de erosão natural. Caracteriza-se como um processo onde ocorre o escoamento de forma uniforme na superfície do solo, caracterizado pela perda da camada superficial do solo, podendo ou não, desencadear sulcos (SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2003).

Geralmente esta forma de erosão é de difícil percepção, decorrente de suas características, acarretando na degradação da estrutura física do solo e da perda da sua fertilidade natural (CARVALHO; LIMA; MORTARI, 2009).

Ainda segundo Magalhães (2009), apesar de ser um processo pouco aparente, pode ser averiguada pelo decréscimo da produtividade agrícola e pela exposição das raízes, onde o solo tenha sido arrastado.

2.1.3.2 *Linear*

A erosão linear caracteriza-se pela formação de canais, onde a remoção e o transporte das partículas do solo são feitos pelo fluxo de escoamento superficial concentrado e em maiores velocidades, que deriva em cortes na superfície do terreno em forma de sulcos, que ao se aprofundar podem evoluir para ravinas e posteriormente para voçorocas (INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

2.1.3.3 *Ravina*

Bertoni e Lombardi Neto (2008) descrevem que o ravinamento é originado por grandes concentrações de fluxo de água na superfície do solo, anos após ano, no mesmo sulco. Dando origem a grandes cavidades em extensão e profundidade.

A ravina indica um processo erosivo mais intenso que o sulco, apresentando feições de maior porte, decorrente do aumento das dimensões do raio hidráulico e do perímetro molhado dos sulcos de erosão pela ação contínua do escoamento superficial (LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011).

Esse tipo de erosão, segundo Selby (1993), pode se deflagrar a partir de uma ruptura da vertente, ou em locais com ausência de cobertura vegetal. Ainda, apresenta que a falta de vegetação somada ao aumento do escoamento superficial, podem contribuir e dar origem à erosão por ravinas.

Segundo Guerra (2010), as formas das ravinas podem desaparecer por maquinários, conjuntamente, com novos eventos chuvosos, originando em uma nova rede de ravinas. Nessa conjuntura, as ravinas são consideradas em sua grande maioria propriedades efêmeras na paisagem.

2.1.3.4 *Voçoroca*

Para Weill e Pires Neto (2007) configura-se uma voçoroca ou boçoroca, como o aprofundamento das ravinas e a intensificação dos processos erosivos superficiais, que podem interceptar o nível freático.

A formação de voçorocas se inicia a partir da erosão intercruzada (laminar ou superficial), que ao concentrar-se formam sulcos, podendo dar origem as ravinas, evoluindo

posteriormente para voçorocas, sendo o estágio mais impactante e que causa os maiores danos (SANTOS; SOBREIRA; COELHO NETO, 2002).

As voçorocas podem atingir vários metros de comprimento e profundidade, devido ao fluxo de água que percorre em seu interior durante os períodos chuvosos, acarretando no desprendimento e arraste de partículas de solo (GUERRA; CUNHA, 2008).

Abdo (2013) diz que as voçorocas podem ser profundas, ramificadas, possuir paredes irregulares e apresentar o formato de “U” no seu perfil vertical. Este tipo de erosão é reconhecido como um grave problema de degradação do solo, resultado da ação conjunta do escoamento superficial e subterrâneo, causando impactos tanto no local, quanto mais distante do seu local de início.

A distinção entre ravinas e voçorocas no Brasil, tem sido realizada por meio do emprego do critério dimensional como característica principal. De acordo com Guerra e Cunha (1998), pelo critério são consideradas ravinas incisões com menos de 50cm de largura e profundidade. Acima desses valores, as erosões são consideradas voçorocas. O escoamento da ravina difere-se da voçoroca, uma vez que nas voçorocas ocorre o escoamento superficial e subterrâneo (LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011).

2.2 FATORES QUE INTERFEREM NA EROSÃO DO SOLO

Os processos erosivos envolvem uma combinação de inúmeras variáveis, condicionados por uma série de fatores internos e externos controladores que determinam a intensidade dos processos erosivos, tais como: precipitação (intensidade, duração e frequência); características das vertentes (declividade, comprimentos da encosta e formato do terreno); solos (textura, estrutura, permeabilidade e as características químicas e mineralógicas); cobertura vegetal e uso do solo. A intervenção do ser humano pode alterar esses fatores, contribuindo para intensificar ou retardando os processos erosivos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008; CARVALHO *et al.*, 2006).

Para Weill e Pires Neto (2007) as interações e as variações entre os fatores condicionantes determinam a extensão e o grau de severidade da erosão nos diferentes locais.

2.2.1 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal compõe um dos mais importantes fatores controladores dos processos erosivos, influenciando as taxas de escoamento superficial, no melhoramento das

condições do solo e na erosão mais que qualquer outro fator físico individual, decorrente da função protetora na dissipação da energia do impacto das gotas da chuva no solo.

Grande parte da energia cinética das gotas d'água são amortecidas pelo revestimento de uma floresta, contribuindo para uma maior dissipação da energia cinética da precipitação, diminuindo o impacto direto no solo (controlando a desagregação) e a desagregação das partículas, reduzindo assim as perdas por erosão (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010; LEPSCH, 2002).

Ainda segundo Tricart (1997), quando não ocorre a interceptação energética pela cobertura vegetal, as gotas d'água atingem o solo com maior velocidade, logo, com maior energia cinética. Assim, a vegetação cumpre o papel de redução da energia gerada pelo impacto das gotas no solo. Em concordância, Bigarella, Becker e Passos (2003), acrescentam que cobertura vegetal reduz o volume de água que atinge o solo, pois atua como reguladora da quantidade de água no escoamento superficial.

Vilar e Prandi (1993) descrevem alguns benefícios proporcionados pela vegetação, como a retenção da água antes que atinja o solo; aumento da permeabilidade e porosidade do solo, por meio da ação das raízes, proteção do solo ao escoamento superficial; redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, da capacidade erosiva da enxurrada.

Contudo, a retirada da cobertura vegetal em si não é o único agente causador da degradação, uma vez que é necessário levar em consideração outros fatores controladores como a topografia, clima, tipo de solo e suas propriedades físicas e atividades antrópicas (CUNHA; GUERRA, 2006).

2.2.2 Tipo de solo

O tipo de solo é um dos fatores determinante na ocorrência de processos erosivos, decorrente de suas características apresentarem maior ou menor facilidade de serem erodidos. Sendo sua maior ou menor susceptibilidade a erosão, dependem das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Carvalho *et al.* (2006) e Jacintho *et al.* (2006) descrevem que além dos fatores condicionantes dos processos erosivos, como a declividade, clima e a cobertura vegetal sejam as mesmas, certos tipos de solo são mais susceptíveis ao destacamento e transporte de suas partículas pelos agentes de erosão. Isso ocorre devido às propriedades dos solos, denominada erodibilidade.

A erodibilidade pode ser definida como um atributo, que expressa, portanto, a sua susceptibilidade ao processo erosivo, dependente das características intrínsecas do solo, e que depende secundariamente, das condições topográficas e da perturbação antrópica, tornando-se dinâmica ao longo do tempo (VILAR; PRANDI, 1993; GUERRA; CUNHA, 2010).

Dentre os fatores mais importantes do solo que afetam sua erodibilidade, se destacam a textura, estratificação, a capacidade de infiltração e de retenção da água no solo, a permeabilidade, teor de matéria orgânica, composição, granulometria e estrutura. Sendo que suas características químicas e biológicas do solo proporcionam maior ou menor resistência a ocorrência de processos erosivos, frente às diferentes condições que o solo é exposto, como a topografia, a precipitação e cobertura vegetal (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

De forma complementar, outro fator que contribui com processo erosivo do solo, é a capacidade do escoamento superficial em desprender as partículas do solo. Esta capacidade em erodir o solo, depende da velocidade do escoamento, turbulência e da quantidade e tipo de material abrasivo que transporta (BERTONI; LOMBARD, 2008).

Nesse contexto, pode-se dizer que em função da grande variabilidade espacial dos solos, são várias as condições que podem influenciar nas taxas de infiltração, de escoamento superficial e de processos erosivos no solo. Deste modo, é de grande importância correlacionar e integrar as diferentes propriedades do solo, para uma melhor avaliação (FENDRICH, 1997).

2.2.3 Clima

A influência do clima pode ser demonstrada principalmente pela ação da precipitação (chuva). A capacidade da chuva em causar erosão do solo, depende de várias características (ARAÚJO; ALMEIDA; GUERRA, 2005). Segundo Sanches *et al.* (2017), a precipitação é um dos fatores climáticos de maior importância no estudo acerca da ocorrência de processos erosivos, já que a combinação deste fator com fatores naturais (declividade, uso do solo e vegetação) e fatores antropogênicos, podem agravar o desencadeamento dos processos erosivos.

As características que mais influenciam no processo erosivo são: a intensidade, a duração e a distribuição e ou frequência da chuva. No entanto, a intensidade e a duração são particularmente importantes no potencial de erosivo da chuva. No que diz respeito à intensidade, quanto maior, menor o tempo e a capacidade de ocorrer o processo de infiltração do solo, contribuindo com o aumento do volume e a velocidade do escoamento superficial,

consequentemente, maiores os riscos de ocorrência da erosão (PRUSKI; GRIEBELER; SILVA, 2009; BERTONI; LOMBARDI NETTO, 2008).

A frequência está relacionada ao número de ocorrência de um evento em um determinado intervalo de tempo. No caso da precipitação, intervalos curtos entre as chuvas, resultam em um solo com um alto teor de umidade, contribuindo com a ocorrência de escoamento, em contrapartida, quando intervalos são maiores, o solo possui um baixo teor de umidade, dificultando a formação de enxurradas (BERTONI; LOMBARDI NETTO, 2008).

As características das chuvas determinam a capacidade do potencial erosivo, isto é, a capacidade que a chuva possui em causar erosão no solo. Desta forma, o índice que representa essa capacidade de a chuva erodir um solo desprotegido, é conhecido como erosividade. Esse parâmetro representa numericamente a força da chuva e do escoamento. Basicamente, a erosividade da chuva depende da intensidade e da energia cinética de impacto das gotas sobre a superfície do solo (CASSOL; LIMA, 2003).

Assim, a erosividade da chuva relaciona impacto das gotas no solo e a ação do escoamento superficial. Para Bertoni e Lombardi Neto (2008), as gotas de chuva que atingem o solo colaboram com processos erosivos de três maneiras: desagregando as partículas do solo no local que sofre o impacto; transportam, por salpicamento, as partículas desagregadas; e por meio da energia concebida ao escoamento superficial.

Logo, a energia do impacto das gotas sobre o solo é responsável pela maior parte de desagregação do material transportado pelo escoamento superficial. Quando a intensidade da chuva atinge uma taxa superior à taxa de infiltração do solo, inicia-se o escoamento (NUNES, 2006).

2.2.4 Topografia

Bertoni e Lombardi Neto (2008) enfatizam que as características da topografia que podem afetar a erosão dizem respeito à declividade, o comprimento da encosta ou vertente e a forma da superfície do terreno, em que atuam em conjunto e exercem grande influência no desencadeamento de processos erosivos.

Em terrenos planos ou com pouca variação de altitude, o escoamento da água ocorre de forma mais lenta e, consequentemente, possui uma menor quantidade de energia e um período maior para o processo de infiltração; já em locais com um maior grau de declive, a resistência do solo ao escoamento das águas é inferior e, por isso, atinge maior velocidade, o que torna mais susceptíveis à erosão hídrica (LEPSCH, 2002; SOUZA; PIRES, 2006).

Bertoni e Lombardi Neto (1999), expõem que o comprimento da vertente é uma variável de suma importância na intensidade do processo erosivo, interferindo nas perdas de solos, à medida que ocorre o aumento da encosta, aumentam as perdas de solos e vice-versa, mesmo possuindo a mesma declividade, tipo de solo, cobertura vegetal e mesma condição climática (precipitação). Isso se dá pelo fato do aumento da velocidade e da massa de água, ser mais longo e, conseqüentemente, um maior poder de desagregar e transportar as partículas de solo.

Outro aspecto a mencionar referente à topografia é a forma das vertentes, que atuam de forma indireta e direta, intervindo no desencadeamento de processos erosivos, escoamento superficial e transportes de sedimentos, com importantes efeitos sobre o balanço de materiais e natureza dos processos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

De acordo com Silva, Schulz e Camargo (2003), existem três tipos de variações nos perfil vertical das vertentes: perfil convexo, onde os trechos mais baixos da encosta possuem declividades acentuadas e os trechos mais altos declividades menores; perfil côncavo refere-se às partes inferiores das encostas, caracteriza-se por apresentar baixas declividades próximas a base, declividade moderada na parte média do perfil e declividade acentuada próxima ao topo; perfil retilíneo apresenta valores de declividade análogos em toda vertente.

2.2.5 Ações Antrópicas

A ação humana, em muitos casos, interfere na dinâmica natural da paisagem, normalmente intensificando a velocidade de mudança da condição natural, devido ao desequilíbrio provocado pela sua ocupação no espaço. Essa interação do ser humano com o meio ambiente, é um dos principais fatores contribuintes para o processo de degradação do solo, colaborando no desencadeamento dos processos erosivos (ROMÃO; SOUZA, 2011).

De acordo com Bigarella, Becker e Passos (2003) os principais fatores que atuam na potencialização dos processos erosivos pode ser evidenciada por meio do manuseio inadequado do uso e cobertura da terra, tanto na área rural quanto na área urbana. Visto que as taxas de erosão do solo e cargas de sedimentos em uma bacia hidrográfica apresentam valores distintos de perda anual de solo por hectare, para diferentes tipos de uso da terra (vegetação nativa, pastagem, solo exposto e cultivo).

Segundo Mota (1991), atividades desenvolvidas pelo ser humano contribuem para a aceleração do processo de erosão do solo, destacando-se: desmatamento de áreas extensas, práticas agrícolas, queimadas, agropecuária, movimentos de terra (escavações e aterros),

alterações no escoamento natural das águas, impermeabilização do solo e atividades de mineração.

Segundo o relatório da FAO (2015), estudos recentes comprovaram que as áreas destinadas ao pastoreio apresentam taxas superiores de perdas de solo, sendo 100-1000 vezes maior que a taxa de perda de solo pela erosão natural. Além disto, essas taxas são substancialmente superiores às taxas de formação do solo.

Fendrich *et al.* (1997), apresenta um resumo dos diferentes fatores condicionantes que contribuem com a evolução do processo erosivo, como topografia, o solo, a cobertura vegetal, as atividades antrópicas e o clima (Quadro 1).

Quadro 1- Fatores condicionantes do processo erosivo

Fator	Contribuição ao processo erosivo
Homem	- Retirada da cobertura vegetal; - Agricultura praticada com manejo impróprio; - Formação de pastos com alta densidade de animais, ocasionando pisoteio excessivo; - Abertura de valetas de forma inadequada (perpendicular às curvas de nível), a fim de proteger culturas; - Abertura de estradas sem obras de drenagem; - Execução de loteamentos sem obras de drenagem e controle de erosão.
Chuva	- Desagregação da estrutura do solo desnudo, pelo impacto das gotas de chuva; - Desagregação do solo superficial, pelo escoamento superficial direto; - Desagregação do subsolo e do desmonte de maciços, pelo escoamento subterrâneo; - Capacidade transportadora da chuva, sobre o solo desagregado; - Capacidade transportadora do escoamento superficial, sobre o solo desagregado; - Capacidade de provocar o deslizamento e quedas de maciços arenosos no pé dos taludes; - Parcela de escoamento superficial excedente, isto é, desconsiderando a parte que infiltra no solo, atua com intensidade no terreno durante alguns minutos e também ao longo dos períodos de chuva. - Parcela do escoamento subterrâneo é menos intensiva sobre o solo, porém, atua continuamente ao longo dos períodos de seca.
Solo	Os solos mais propícios à formação de voçorocas são: - Do tipo arenoso, secos e ácidos, poucos coesivos, coluviais e porosos, apresentando o horizonte A constituídos por areia muito fina, siltosa e pouca argila; - Solos jovens e/ou rasos com acúmulo de argila iluvial no horizonte B; - Solos com camadas de impedimento à drenagem até 1,0 metro da superfície (presença de litoplintitas, duripans ou qualquer outra camada de impedimento).
Topografia	- As voçorocas ocorrem tanto em terrenos levemente ondulados, como naqueles de topografia acidentada. A topografia influi na sua velocidade de formação e desenvolvimento dos locais que apresentam maior densidade de drenagem, dada pela quantidade de talvegues, sulcos e valetas.
Clima	- Com base no índice de Classificação Internacional de Climas de KOEPPEN, as regiões aís atingidas pela erosão são caracterizadas pelas classes de clima úmido, tropical quente e temperado, (Cwa e Aw) e Cfa, com inverno seco e verão chuvoso respectivamente.

Fonte: Adaptado de Fendrich *et al.* (1997).

2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS

Os métodos para a avaliação da erosão hídrica têm como objetivo a quantificação e qualificação deste fenômeno. Em síntese os métodos abrangem uma análise sistêmica com o propósito de compreender o ambiente físico e as ações antrópicas, de forma concomitante (SOUZA *et al.*, 2014).

Em geral, na literatura, são aplicados métodos quantitativos e qualitativos (Quadro 2) para desenvolver a análise da susceptibilidade dos terrenos à ocorrência de processos erosivos (SPORL, 2007). Como descrito por Almorox, Bermudéx e Rafaelli (2010), o método qualitativo é voltado para a análise das formas e graus de erosão, e a quantitativa considera as características pertinentes ao sistema.

Quadro 2 - Métodos de avaliação de erosão hídrica

Método Qualitativo	Formas de erosão Graus de erosão	
Método Quantitativo	Avaliação Direta	
	Avaliação Indireta	Modelo físico
		Modelo estatístico
		Modelo Paramétrico

Fonte: Almorox, Bermudéx e Rafaelli (2010).

2.3.1 Método Qualitativo

Métodos qualitativos apresentam diferentes características que controlam os processos erosivos, sem empregar valores numéricos. Para Sporl (2007), tais métodos têm como objetivo avaliar a origem e a evolução dos processos erosivos, no que se refere aos fatores condicionantes e mecanismos contribuintes para o desencadeamento e seu desenvolvimento, visando medidas para auxiliar na prevenção, no seu controle e preservação.

Segundo Chaves *et al.* (1996) a análise qualitativa tem como principal vantagem a manipulação dos elementos do meio físico em termos de grau de risco de erosão, e posteriormente a sua integração para a obtenção das taxas de erosão.

Dentre as técnicas utilizadas para a análise do desencadeamento de erosão a partir do método qualitativo, é evidenciado o uso do Sensoriamento Remoto, para efetivar-se a fotointerpretação, de outro modo, a análise de objetos em fotografias aéreas, imagens de satélite ou radar (SÁ, 2001; BOUAZIZ; WIJAYA; GLOAGUEN, 2009).

2.3.2 Método Quantitativo

Como descrito por Spori (2007) o método quantitativo analisa os processos erosivos baseado em números, possibilitando a estimação das mudanças e perdas de solo, isto é, quantificar o fenômeno.

A quantificação do processo erosivo com informações reais e atuais de uma área de estudo, pode ser realizada por diferentes métodos. Tais métodos têm como finalidade estimar e definir, as variações e perdas de solo em termos de quantidade (LOHMANN, 2005). Dentre as metodologias disponíveis para a quantificação de perdas de solo, a mais empregada é a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) – Universal Soil Loss Equation (USLE), proposta por Wischmeier e Smith (1965).

De acordo com Camargo *et al.* (2012) a quantificação de alguns parâmetros pode ser adquirida a partir de avaliações diretas e indiretas, dependendo da disponibilidade física, de tempo e recursos para a sua execução.

2.3.2.1 Avaliação Direta

Na avaliação direta, os parâmetros de análise são obtidos a partir de experimentos efetivados na área de estudo, ou seja, *in situ*. Com base nos ensaios de solo, simuladores de chuva, bem como mensuração de características físicas e medidas de parâmetros associados aos sedimentos do solo, matéria orgânica e fósforo, possibilita estimar os fatores de erosão e quantificar a perda de solo (KONZ; PRASUHN; ALEWELL, 2012),

Para Moreno *et al.* (2003) os métodos diretos geralmente apresentam dados precisos na avaliação da erosão hídrica, entretanto, são onerosos e geralmente demandam maior tempo e custo. Além disso, a avaliação direta da erodibilidade obtida em campo em determinado solo não pode ser extrapolada para solos da mesma classe em outros locais, já que existe uma grande variabilidade nas propriedades dentro da mesma classe de solo (ALBURQUERQUE; CASSOL; REINERT, 2000).

2.3.2.2 Avaliação Indireta

No atual cenário da problemática acerca do aumento de degradação dos recursos naturais, tem-se aumentado a demanda por informações referentes à quantificação da erosão e

da produção de sedimentos (WALLING, 2005). Em vista disso, a utilização de modelos para simplificar a realidade do sistema natural, é fundamental para desenvolver a análise e compreensão do processo erosivo (SILVA, 2003).

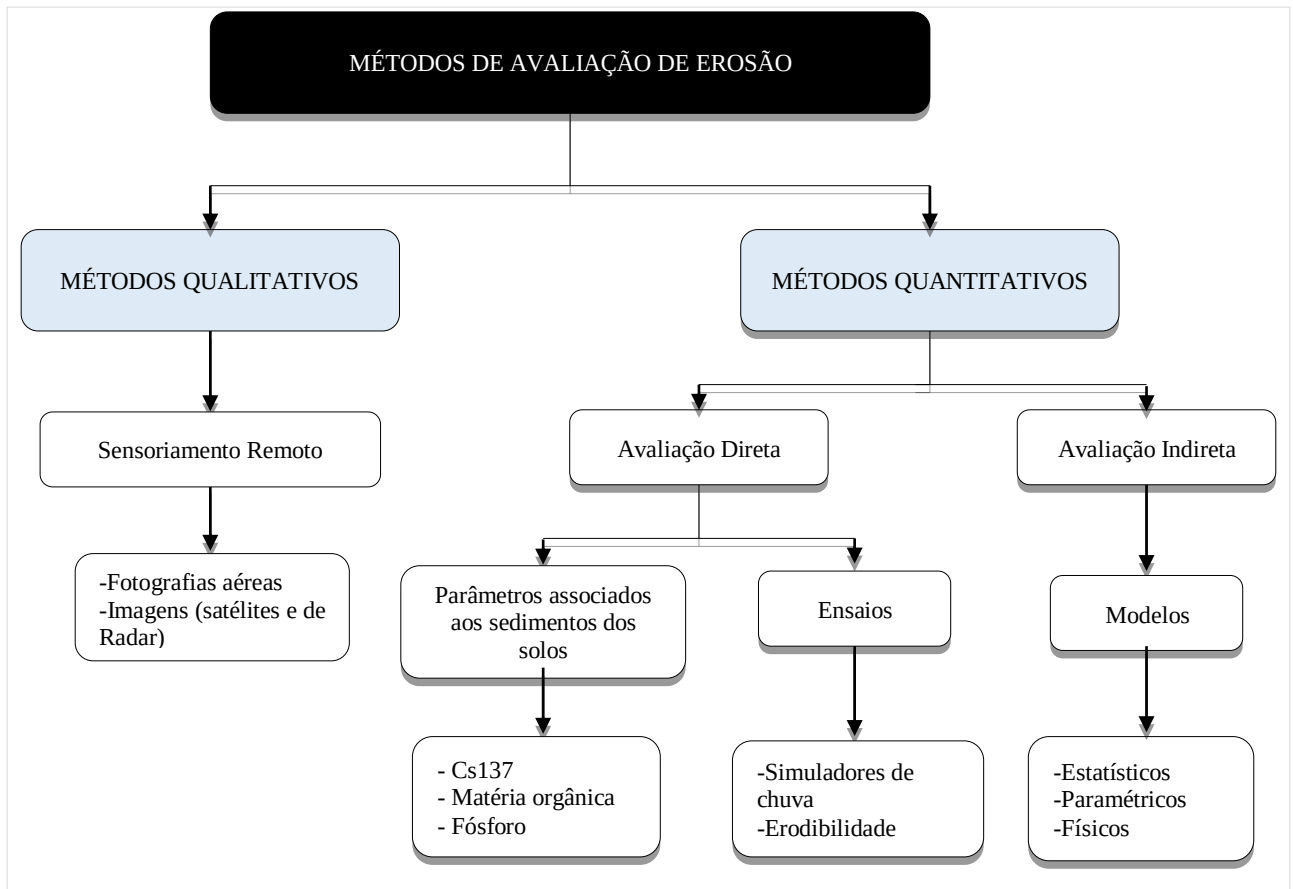
Como descrito por Nearing, Lane e Lopes (1994), existem três motivos para efetuar a modelagem da erosão: os modelos de erosão podem ser utilizados como ferramenta para estimar-se a perda de solos; os modelos matemáticos fisicamente baseados podem indicar o limiar topográfico para predição do desencadeamento de canais de erosão, auxiliando no planejamento de práticas conservacionistas que reduzam a erosão; e por fim, os modelos podem ser utilizados como ferramenta para compreender o desencadeamento dos processos erosivos e suas interações.

De acordo com o Aksoy e Kavvas (2005), os modelos de predição são essenciais, pois uma vez comprovada a sua adequação e confiabilidade, possibilita a avaliação em diferentes cenários de manejo do solo sem a necessidade de testes de campo, como é o caso da avaliação direta, comumente custosos e demorados.

Uma das vantagens em utilizar os métodos indiretos está na rapidez da determinação da erodibilidade dos solos, quando comparado com os métodos diretos convencionais, além de permitir a estimativa por meio de parâmetros obtidos por análises laboratoriais de fácil execução (CORRECHEL, 2003).

Os modelos utilizados para simplificar o mundo real são divididos em: estatístico, físico e paramétrico. A Figura 1 apresenta um esquema sobre os métodos de avaliação de erosão, segundo o Almorox *et al.* (1994).

Figura 1- Fluxograma dos métodos de avaliação de erosão hídrica.



Fonte: Adaptado de Almorox *et al.* (1994).

2.4 GEOPROCESSAMENTO

Na atualidade, as formas de degradação do solo têm sido amplamente discutidas, decorrente de suas consequências ambientais, sociais e econômicas significativas. A erosão do solo é considerada a principal e mais generalizada forma de degradação do solo e, portanto, sendo de grande importância estudos que avaliem a susceptibilidade à erosão nos diferentes tipos de solo, assim como as variações e taxas com que esses processos erosivos ocorrem e suas consequências na paisagem.

Segundo Freng *et al.* 2005, muitas tecnologias são propostas para a avaliação da degradação ambiental, entre eles, o geoprocessamento, visando identificar e caracterizar áreas degradadas e monitorar as tendências das degradações.

Para Silva (2007) o geoprocessamento é um termo amplo, que engloba um conjunto de tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos, a partir de programas

computacionais, no qual pode ser aplicado em diversas áreas científicas, como por exemplo, cartografia, agricultura, geologia e hidrologia.

Por conseguinte, o uso das técnicas do geoprocessamento, possibilita realizar a coleta e o processamento de dados para posteriores análises, visando a solução de problemas em ampla escala (ROSA, 2005), além de possibilitar a avaliação da perda dos solos por erosão, as taxas com que esses processos ocorrem e a aplicação de modelos teóricos que relacionam os agentes desencadeadores de erosão, possibilitando uma melhor gestão no território de uma bacia hidrográfica (BARBOSA; FURRIER, 1998).

Em síntese, o geoprocessamento tem como objetivo solucionar problemas ambientais levando em consideração a localização, a extensão e as associações existentes entre os fenômenos avaliados, visando a sua exemplificação (JACQUES, 1997).

Para Silva (2003) o geoprocessamento representa qualquer tipo de processamento de dados georreferenciados. Envolve técnicas e conceitos de cartografia, Sensoriamento Remoto, e Sistema de Informações Geográficas (SIG).

2.4.1 Sistema de Informação Geográfica

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser definido como um sistema destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise e representação de dados referenciados espacialmente na superfície terrestre, integrando diversas tecnologias. Ou seja, trata-se de um conjunto de ferramentas computacionais que permite a análise, edição de dados, de mapa e informações geograficamente referenciadas para a representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem (CASCALES; ELVIRA; LOZANO, 2013).

Como descrito por Oliveira *et al.* (2008) a utilização do SIG tem sido importante no âmbito de monitoramento ambiental, por oferecer mecanismos que permitem a integração de diferentes informações, proporcionando uma visão mais ampla e precisa do local de estudo.

Além disso, a tecnologia SIG tem sido utilizada por vários setores que tratam da questão ambiental, como uma ferramenta importante para o planejamento ambiental, pois permite uma análise integrada de várias variáveis do meio físico, de forma simplificada e, possibilita uma rápida geração de informações intermediárias e finais (DONHA; SOUZA; SUGAMOSTO, 2006).

O uso de SIG auxilia na identificação de áreas cujo solo apresenta maior susceptibilidade à erosão e na predição de padrões de erosão do solo. Sendo o SIG, e os modelos de erosão, importantes ferramentas na avaliação de alternativas de gestão do

território agrícola e no planejamento de ações preventivas à erosão (PANAGOPOULOS; ANTUNES, 2008).

Segundo Neves (2017), vários trabalhos têm utilizado o processamento automático de dados espaciais com na obtenção diferentes dados, como modelo digital de elevação, mapa de declividades, mapa de área de drenagem, rede de drenagem, entre outros. São vários os trabalhos que utilizaram o SIG, seja para obtenção do MDE (Modelo Digital de Elevação) ou parâmetros A e S, para elaboração do limiar crítico de desencadeamento de processos erosivos.

Neste contexto, pode-se dizer que a avaliação da erosão do solo quando integrada com as geotecnologias, como é o caso do SIG, permite estimar a erosão do solo e a sua distribuição espacial com um menor tempo, custo e mão de obra requerida, visto que as práticas convencionais são mais onerosas, demandando um maior tempo para sua realização.

2.4.2 Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) consiste em uma matriz no qual possui atribuído a cada célula (pixel) um valor de elevação, isto é, um arquivo estruturado em linhas e colunas, contendo registros altimétricos. Desta forma, o MDE pode ser definido como uma representação tridimensional e contínua do relevo, definida em um sistema de projeção cartográfica (VALERIANO, 2008).

Conforme Nelson, Reuter e Gessler (2009), os MDEs são elaborados por meio de três fontes de dados sendo: Técnicas de levantamento de campo, a partir da obtenção de pontos precisos com as respectivas coordenadas latitude e longitude (x e y) e elevação (z); Mapas topográficos existentes, com a derivação de curvas de nível, rede de drenagem, lagos e pontos cotados; Sensoriamento remoto, com a interpretação de fotografias aéreas ou de imagens adquiridas de satélites, como a fotogrametria, radares e, mais recentemente, com os levantamentos a Laser.

Para elaboração do MDE utiliza-se a interpolação dos dados baseado em técnicas de diferenças finitas (HUTCHINSON, 1988). O processamento é otimizado pelo método Inverso da Distância Ponderada (IDW - Inverse Distance Weighted). Esse interpolador é considerado o método mais simples de interpolação, no qual estima um valor para um local não amostrado como uma média dos valores dos dados dentro de uma vizinhança, atribuindo peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo esse peso com o aumento da distância (RIGHI; BASSO, 2016).

Para Marion, Santos e Hendges (2015) o MDE consiste em uma das principais formas de representação do relevo, que podem ser utilizados para extração de informações, como a declividade, orientação de vertentes e curvatura do terreno.

Ainda, segundo Lin *et al.* (2006), o seu uso permite definir a direção do fluxo da água, delimitar as bacias hidrográficas e o cálculo das áreas de contribuição de forma mais rápida, baseado nas características morfológicas da bacia, tornando-se o método mais empregado para cálculos geomorfológicos e extração de informações hidrológicas.

2.4.3 Aspectos Hidrológicos

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e sua aplicação em bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de ações de forma automática como a delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas, rede de drenagem, mapas de direção de fluxo, fluxo acumulado, área de contribuição, entre outros.

O uso do processamento automático de dados espaciais visando à análise hidrológica tem sido cada vez mais frequente, por meio da aplicação de diferentes algoritmos. O algoritmo D-Infinity proposto por Tarboton, tem-se mostrado eficiente em análises hidrológicas, uma vez que permite uma melhor representação dos divisores de água e canais de drenagem, isto é, um maior detalhamento e definição dos caminhos preferenciais do fluxo que formam a rede de drenagem da sub-bacia (NEVES, 2017; BOSQUILIA *et al.*, 2015).

Neste método, a direção do fluxo é centrada em um pixel de interesse e direcionada para o pixel que possui a maior elevação entre as oito facetas triangulares, que evitam a propagação de valores aproximados e a influência dos pixels vizinhos com menor valor de elevação. Caso as direções não sejam cardinais ou diagonais, considera-se o ângulo entre os dois pixels descendentes (TARBOTON, 1997).

2.5 BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, análise e gestão ambiental, possibilita uma melhor compreensão dos diferentes processos atuantes nela, seja de ordem natural ou antrópica, pois permite a integração de vários elementos constituintes da paisagem (geologia, clima, solo, relevo, hidrologia e uso e ocupação da terra) (FERNANDES; SILVA, 1994; BOTELHO, 1999; CUNHA; GUERRA, 2006; FREITAS, 2008).

No Brasil, a importância do estudo acerca da bacia hidrográfica é evidenciada por passar a ser, também, uma unidade de gestão ambiental, legitimada pela Lei Federal Nº 9.433 de janeiro de 1997 – Política Nacional dos Recursos Hídricos. Essa lei estabeleceu princípios e instrumentos para a gestão da água em âmbito nacional, onde as bacias hidrográficas são consideradas unidades de planejamento (NASCIMENTO *et al.*, 2010).

Uma das vantagens em utilizar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão ambiental deve-se ao fato de compor um sistema bem delimitado no espaço, definidos por seus divisores de águas, o que estabelece limites mais visíveis, possibilitando uma análise integrada dos fenômenos de forma facilitada (SANTOS; RUFINO, 2003). Do mesmo modo, não há qualquer área de terra, por menor que seja que não se integre a uma bacia hidrográfica (NASCIMENTO; VILAÇA, 2008).

Contudo, antes de adotá-la como unidade de planejamento, é necessário conhecer e compreender sua definição. A bacia hidrográfica é definida como uma área natural de captação da água de precipitação composta por cursos d'água que convergem o escoamento para um único ponto de saída, o exutório. Esta área é composta por um conjunto de superfícies vertentes e por uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único (TUCCI, 1997; SILVEIRA, 2001).

Em concordância, Vieira, Braz e Mirandola (2012), retratam a bacia hidrográfica como uma área de drenagem constituída por um conjunto de cursos de água que convergem até o rio principal, sendo limitada pelos divisores de água a montante, correspondentes aos pontos mais elevados do terreno. Por convenção, o rio principal de uma bacia hidrográfica é a maior linha de fluxo de água que liga uma nascente ao exutório. Os drenos de segunda ordem conduzem a água diretamente ao rio principal, denominados de afluentes e, da mesma forma, os rios que confluem para os afluentes são subafluentes do rio principal (CRUZ; TAVARES, 2009).

As mudanças provocadas no interior da bacia de drenagem podem ter causas naturais ou antrópicas, entretanto, nos últimos anos, a ação do ser humano tem sido um agente acelerador dos processos modificadores e de desequilíbrio da paisagem (CUNHA; GUERRA, 2006; LEITE; ROSA, 2009).

Weill e Pires Neto (2007); Barbosa e Furrier (2009), por sua vez, ressaltam que as bacias hidrográficas integram uma visão conjunta das condições naturais e das ações antrópicas nelas desenvolvidas, de tal maneira que qualquer tipo de alteração natural ou antrópica que venha ocorrer numa parte do sistema pode afetar outras áreas ou até mesmo todo o processo hidrológico, gerando alterações e impactos a jusante e montante, alterando o

balanço hídrico, isto é, o fluxo energético de entrada e de saída da água ou descargas residuais.

Portanto, pelo caráter integrador, a bacia hidrográfica pode ser considerada uma excelente unidade de gestão dos elementos naturais e sociais. Nesse contexto, Guerra e Cunha (1998), apresentam a possibilidade em acompanhar e monitorar as mudanças provocadas pelo homem e, conseqüentemente, os impactos provenientes dessas alterações, como a erosão dos solos, enchentes e movimentos de massa, visto que o uso da bacia permite a integração de vários elementos constituintes.

2.6 ÍNDICES QUE RELACIONAM ÁREA (A) *VERSUS* DECLIVIDADE (S)

Diversas pesquisas têm utilizado índices de limiares críticos para determinar a ocorrência de processos erosivos, em diferentes tipos de solos e condições climáticas. Segundo Vandekerckhove *et al.* (1998) são várias as pesquisas que abordam o papel dos fatores topográficos no processo de desencadeamento de erosão e na obtenção do limiar crítico correspondentes as relações, como é o caso da área de drenagem e a declividade.

Apesar dos limiares topográficos serem empregues para prever o desencadeamento dos processos erosivos, vale ressaltar que a determinação do limiar crítico na ocorrência de erosão depende de outros fatores além da topografia que devem ser levados em consideração (NACHTERGAELE; POESEN; GOVERS, 2002).

O conceito de limiar de erosão por escoamento superficial foi primeiramente apresentado por Horton (1945), estabelecendo que a erosão só ocorre quando a tensão de cisalhamento gerada pelo escoamento superficial da água é superior a resistência do solo. Ele definiu o “ comprimento do fluxo terrestre” como a distância percorrida pelo escoamento antes de concentrar-se em canais permanentes de drenagem. Tal fator topográfico pode ser interpretado como uma medida para a determinação do limiar de resistência da superfície a ocorrência de erosão do solo.

A partir deste contexto, Patton e Schumm (1975) e Montgomery e Dietrich (1988) propuseram modelos de erosão, baseados em observações de campo, no qual estabelece uma relação entre a área de contribuição (A) e declividade (S), possibilitando obter um indicador do limiar crítico para o desencadeamento de canais, de modo que essa relação permita compreender as mudanças na paisagem.

O conceito baseia-se na relação da seguinte equação: $S = aA^{-b}$, sendo A correspondente a área de drenagem (ha), a e $-b$ são coeficientes, que indicam a posição e a

inclinação da reta, sendo dependentes das características do ambiente. Os vales que estão localizados acima da linha limite trata-se de regiões instáveis e passível de ocorrência de erosão.

De acordo com Vandekerckhove *et al.* (1998) e Vandaele *et al.* (1996) os valores de limiares são distintos em locais que possuem diferentes características geológicas, pedológicas, climáticas e tipos vegetação. Além disso, todo o processo desde a forma de aquisição dos dados até os procedimentos adotados para a análise, podem ser obtidas algumas diferenças.

A partir dessa relação diversos estudos foram desenvolvidos, tendo como finalidade a obtenção de limiares para o desencadeamento do processo erosivo em diversos locais, como é apresentado na Quadro 3. Na tabela é apresentado os valores dos coeficientes ‘a’ e ‘-b’, no qual possui uma variação em função das características locais, determinadas em função do clima, cobertura vegetal, uso do solo, substrato rochoso, entre outras.

Quadro 3 - Valores dos coeficientes de regressão (“a” e “-b”) em diversos estudos realizados no mundo

Autores	Local		a	-b
Patton e Schumm (1975)	Colorado		0,16	0,26
Schumm <i>et al.</i> (1980)	Colorado		0,008	0,26
Montgomery e Dietrich (1988)	Oregon (EUA)		0,25	0,40
	Califórnia (EUA)		0,27	0,40
	Nevada (EUA)		0,35	0,60
Vandaele <i>et al.</i> (1996)	Portugal		0,02	0,35
Vandekerckhove <i>et al.</i> (2000)	Espanha		0,23	0,10
Menendez-Duarte <i>et al.</i> (2007)	Espanha	Canais Rasos	0,3451	0,252
		Canais Profundos	0,4568	0,176
Araújo (2011)	Brasil	Canais Rasos	0,0128	0,443
		Canais Profundos	0,0219	0,376
Stabile (2013)	Brasil		0,064	0,084
Neves (2017)	Brasil	Análise integrada	0,060	0,280

Fonte: Adaptado de Araújo (2011).

A obtenção dos parâmetros utilizados para a análise da relação área de contribuição e declividade podem ser obtidos por diferentes métodos, destacando-se: fotografia aérea, levantamento de campo, mapa topográfico, modelo digital de elevação (MDE) e também com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A Quadro 4 apresenta um levantamento do uso de diferentes métodos para o estudo dos processos erosivos em diferentes localidades.

Quadro 4 - Dados e métodos utilizados na análise de processos erosivos

Região	Autores	Método	Calculo da declividade	Calculo da área de drenagem	Processo analisado
Centro da Bélgica	Poesen <i>et al.</i> (1995)	Trabalho de campo	Mensuração em campo	Mensuração em campo	Ravinas
Portugal	Vandaele <i>et al.</i> (1995)	Fotografia aérea	SIG e mapa topográfico (1: 25.000)	SIG	Ravinas
Colorado (E.U.A)	Patton and Schumm (1975)	Fotografia aérea	Mapa topográfico (1: 50.000)	Mapa topográfico	Canais descontínuos
Espanha e Portugal	Vanderkerckhove <i>et al.</i> (1998)	Trabalho de campo	Mensuração em campo	Mensuração em campo	Sulcos
Espanha	Menéndez-Duarte <i>et al.</i> (2007)	Fotografia aérea e trabalho de campo	MDE	SIG	Canais
Brasil	Araújo (2011)	Fotografia aérea e trabalho de campo	Mensuração em campo e MDT	SIG (D8)	Canais
Brasil	Stabile (2013)	Fotografia aérea e trabalho de campo	Mensuração em campo e MDT	SIG	Canais
Brasil	Neves (2017)	Imagem de satélite	MDT	SIG (D8 e D-Infinity)	Canais

Fonte: Adaptado de Torri e Poesen (2014).

Apesar do levantamento de campo das feições erosivas ser mais preciso, o uso das fotografias aéreas pode ser mais vantajoso, pois possibilita realizar uma análise temporal, quando comparado ao método convencional (Vandaele *et al.*, 1996).

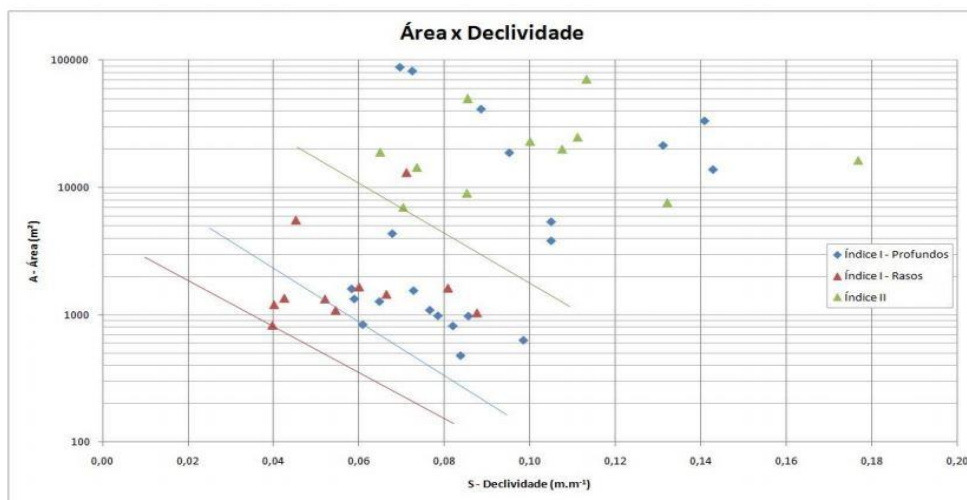
Diante do fato dos limiares topográficos apresentarem valores distintos para cada região, decorrente das características locais, é visto a necessidade em determinar os limiares para diversos locais. Vieira (2002) analisou o desencadeamento de canais relacionando-os aos índices de área de contribuição e a declividade, tendo em vista que estes definem os limiares críticos para o início de canais e, por conseguinte, para o desencadeamento de processos erosivos.

No Brasil, Araújo (2011) analisou o desencadeamento de feições erosivas na região de São Pedro – SP relacionando-os aos índices de área de contribuição e a declividade,

propondo dois índices (I e II). Inicialmente foi utilizado o índice I para o estudo das cabeceiras de erosão utilizando fotografias aéreas antigas, dividindo os canais em rasos (<1m) e profundos (>1m). Já para o índice II foi considerado somente os canais profundos, decorrente da escala das fotografias aéreas ortorretificadas (1:25.000 e 1:30.000) não permitir observar os canais rasos.

A Figura 2 apresenta os limiares topográficos para o Índice I (rasos e profundos) e o Índice II (canais profundos). A declividade crítica para o desencadeamento do processo erosivo foi obtida para os dois índices, considerando a mesma área de contribuição (1000 m²). Para o Índice I, a declividade crítica em canal raso foi de 3,55% e para os canais profundos 5,2%. Entretanto, para o Índice II considerando apenas os canais profundos, a declividade crítica obtida foi de 5,2%. Foi possível constatar que para uma mesma área de contribuição, as declividades maiores conduzem ao desencadeamento de processos erosivos de maiores dimensões.

Figura 2 - Gráfico com os limiares do índice I e II representados



Fonte: Araújo (2011).

Neves (2017) também desenvolveu um trabalho na região de São Pedro – SP, mas considerando o mapeamento de novas feições localizadas na Bacia do Córrego do Meio, utilizando imagens de satélite (SPOT/ Pléiades) do ano de 2016 e ortofotos da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA) (2011). Os parâmetros A e S foram obtidos por ferramentas de SIG, com diferentes pixels de saída, utilizando dois algoritmos D8 e D-Infinity (TARBOTON, 1997) para o processamento dos dados hidrológicos.

Foi evidenciado que além dos fatores naturais, as ações antrópicas podem originar em fortes influências no percentual de áreas críticas para o desencadeamento de processos erosivos, acarretando no surgimento de processos erosivos mais complexos.

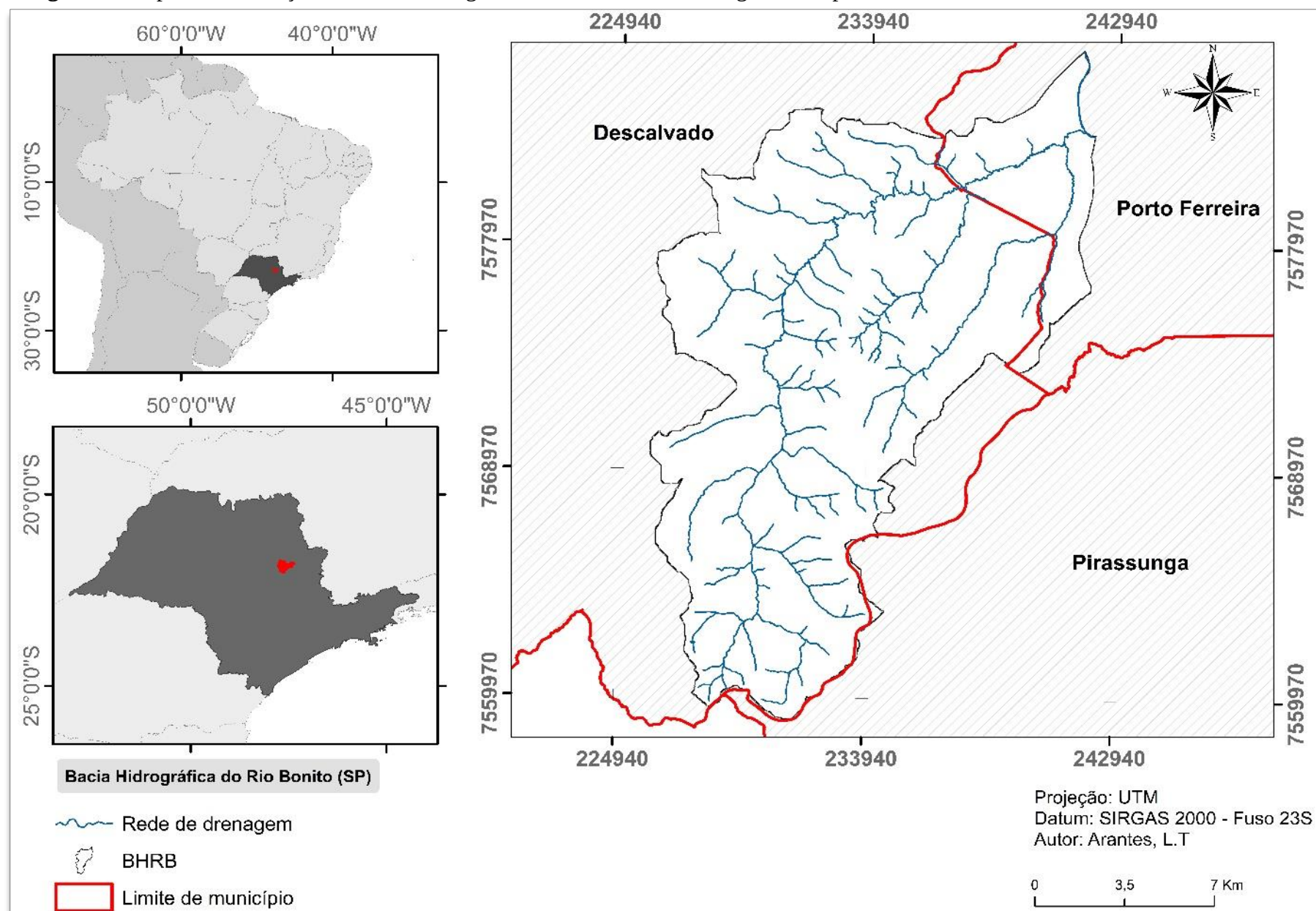
Outro estudo desenvolvido por Stabile (2013), no município de Piratininga (SP), avaliou os limiares críticos para o desencadeamento de erosões lineares. A mensuração da declividade (S) foi feita por duas formas, em campo e a partir do Modelo Digital de Elevação (MDT), já para a área de contribuição (A) foi obtida apenas pelo MDT. O autor concluiu que o método utilizado para a mensuração de S e A resultou em algumas variações significativa dos dados gerados, quando comparado os valores obtidos em campo e pelo MDT.

3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Bonito (BHRB) corresponde à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Mogi Guaçu (UGRHI-09), inserida na bacia hidrográfica do Rio Grande pertencente à região hidrográfica do Paraná. A bacia em estudo está localizada entre as coordenadas UTM 226200 mE; 244000 mE; 7558000 mN; e, 7584000 mN, do Datum SIRGAS 2000 – Fuso 23 Sul, com área de 223 km². Situa-se na região centro-leste do Estado de São Paulo, sendo sua maior extensão inserida no município de Descalvado (200 km²), e uma pequena porção no município de Porto Ferreira (23km²) (Figura 3).

Figura 3- Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito e os registros de processos erosivos



O Rio Bonito que drena a região de estudo, tem suas nascentes situadas na Serra Grande, morro do Quadrão, a uma altitude de 1.042 m e percorre toda a área com uma extensão de 38,50 km até atingir a margem direita do rio Mogi-Guaçu.

O município de Descalvado possui uma área territorial de 753 km²; população de 33.520 habitantes; Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* de 36.991,94 reais. Sendo considerada uma das regiões mais produtivas do Estado de São Paulo, tendo como base de sua economia a agropecuária, destacando-se os setores de avicultura, a cultura de laranja, cana-de-açúcar e pecuária (OLIVEIRA, 1995).

3.2 CLIMA E VEGETAÇÃO

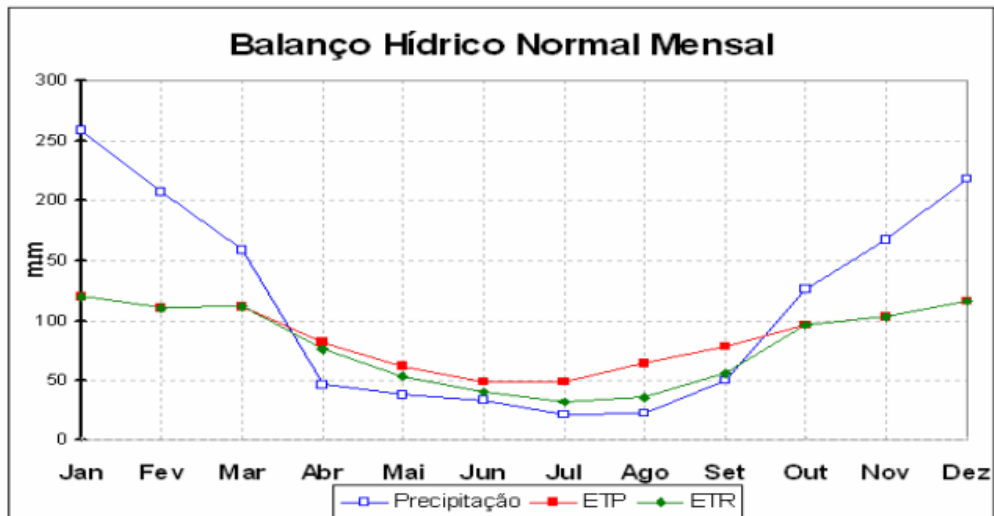
Segundo o IBGE (2013), o bioma predominante no município de Descalvado é o cerrado, já em Porto Ferreira o bioma da Mata Atlântica abrange a maior parte do município. Os tipos de vegetações predominantes na região, conforme o Mapa Florestal do Estado de São Paulo Descalvado e Porto Ferreira – 1: 180.000, são as áreas de mata, capoeira, cerrado, cerradão e vegetação de várzea.

No trabalho desenvolvido por Oliveira (1995), foi constatado a partir da interpretação de imagens de satélite, formações como (cerrado e cerradão “senso estrito”), mata mesófila (floresta estacional semidecidual) e a mata ciliar (OLIVEIRA, 1995).

O clima da região de acordo com o sistema de Köppen, pode ser classificado como do tipo Cwa, ou seja, mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, cuja a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° C e a do mês mais quente acima de 22°C (CANÇADO; LORANDI; COSTA, 2014).

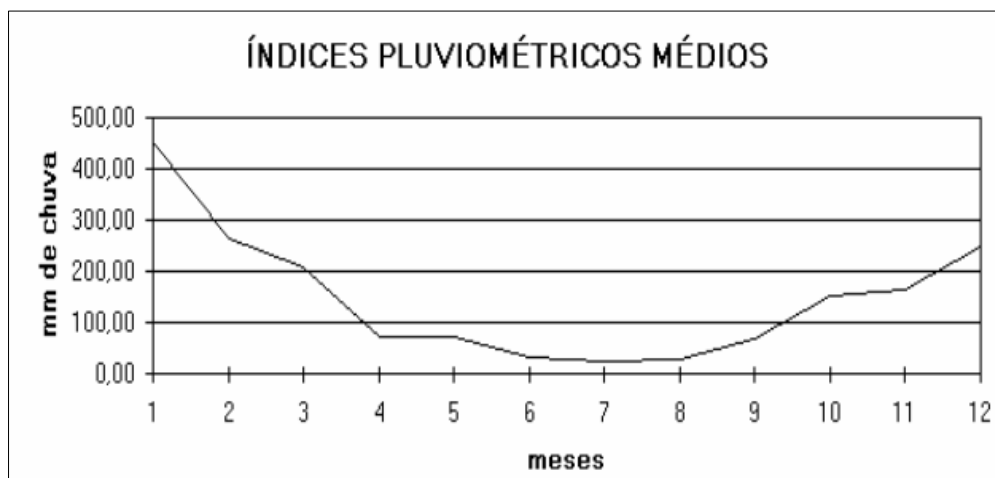
Segundo Feres (2002) o balanço hídrico da bacia apresenta uma diferenciação nítida entre as estações de seca (maio a setembro), e consequentemente apresentando deficiência hídrica e, a chuvosa (outubro a abril). As Figuras 4 e 5 apresenta a média dos dados pluviométricos mensais e o balanço hídrico mensal, para o período de 1942 a 2000.

Figura 4 - Índices pluviométricos médios do período de 1990 a 2002



Fonte: Neves (2005).

Figura 5 - Balanço hídrico mensal de Descalvado.



Fonte: Neves (2005).

3.3 GEOMORFOLOGIA

De acordo com a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo, a BHRB está inserida na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, abrangendo parcialmente duas unidades morfoesculturais, sendo a sua maior parte situada na Unidade Morfoescultural do Planalto Ocidental Paulista e uma menor porção abrangendo a Unidade Morfoescultural da Depressão Periférica Paulista (Quadro 5).

Quadro 5 - Unidades geomorfológicas ocorrentes na bacia do Rio Bonito

Unidade Morfoestrutural	Unidades Morfoesculturais	
Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná	Planalto Ocidental Paulista	Planalto Residual de São Carlos
		Patamares Estruturais de Ribeirão Preto
	Depressão Periférica Paulista	Depressão Mogi-Guaçu

Fonte: Adaptado de Cançado, Lorandi e Costa (2014).

O Planalto Ocidental Paulista abrange praticamente 50% da área total do Estado de São Paulo, sendo sua maior área distribuída sobre a bacia do Rio Bonito na unidade morfoescultural denominada Planalto Residual de São Carlos, possuindo uma pequena porção na unidade morfoescultural denominada Patamares Estruturais de Ribeirão Preto (CANÇADO; LORANDI; COSTA, 2014; FERES, 2002).

Dentro do Planalto Ocidental Paulista tem-se o Planalto Residual de São Carlos cujo modelado é constituído basicamente por colinas de topos convexos (Dc) e tabulares (Dt), apresentando formas de dissecação média, com vale entalhados e densidade de drenagem média a alta, o que implica, em um nível baixo a médio de fragilidade potencial, para os terrenos poucos dissecados um nível baixo e um nível alto a muito alto para terrenos muito dissecados (CANÇADO; LORANDI; COSTA, 2014).

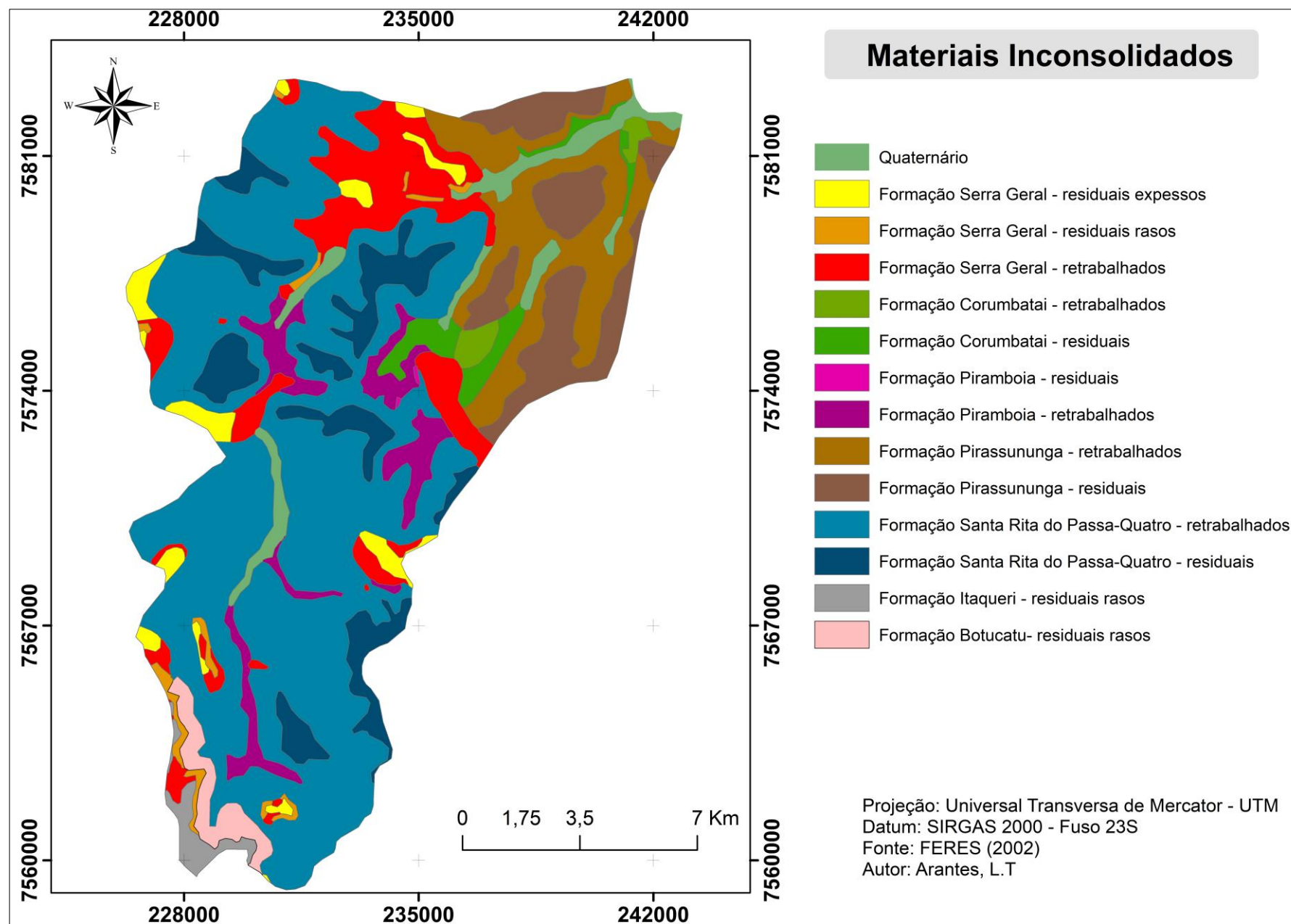
Ainda segundo os autores, a unidade morfoescultural denominada Patamares Estruturais de Ribeirão Preto cujo modelado constitui-se basicamente por colinas amplas e baixas com topos tabulares (Dt), tendo os vales entalhamento médio com menos de 20m e a dimensão interfluvial variando de 750 m até mais de 3750 m, apresenta formas de relevo pouco dissecado com vales pouco entalhados, com encostas de declividades baixas, solos argilosos, apresentando baixo potencial a ocorrência de processos erosivos

Na área correspondente à Depressão Periférica Paulista, a bacia do Rio Bonito situa-se sobre a unidade morfológica denominada Depressão de Mogi-Guaçu. Nesta unidade predominam formas de relevo denudacionais cujo modelado constitui-se basicamente por colinas de topos tabulares amplos, onde os vales são entalhados até 20 m e a dimensão interfluvial oscila entre 1750 a 3750 m. As altimetrias predominantes estão entre 500 e 650m, e as declividades predominam entre 5 e 10% (FERES, 2002).

3.4 GEOLOGIA

Segundo Torezan (2000), a região de estudo situa-se na Bacia Sedimentar do Paraná e apresenta as seguintes formações geológicas: Formação Corumbataí, Formação Pirambóia, Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas, Formação Itaqueri, Formação Santa Rita do Passa-Quatro, Formação Piraçununga e Depósitos recentes (Figura 6).

Figura 6- Mapa de materiais inconsolidados na bacia do Rio Bonito



As unidades de materiais inconsolidados foram mapeadas por Feres (2002), onde são evidenciadas as principais características de relevo e atributos de ocorrência esperadas para cada uma no estudo dos processos erosivos (Quadro 6).

Quadro 6 -Unidades do mapa de materiais inconsolidados

(Continua)

Origem geológica			Classes	Relevo	Características
CENOZÓICO	Quaternário	Quaternário	Indiscriminada	Terrenos planos de fundo de vale	Materiais de textura indiscriminada, decorrentes de depósitos recentes. Nível d'água aflorante e baixa permeabilidade (10^{-5} cm/s)
	Terciário	Formação Santa Rita do Passa-Quatro	Residuais	Topos planos Declividade <5%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-4} e 10^{-3} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura $\cong$ 8m.
			Retrabalhados	Vales e encostas com decl. >5%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-4} e 10^{-3} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura de 5 a 8m.
		Formação Pirassununga	Residuais	Topos planos Declividade <5%	Permeabilidade alta, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura de $\cong$ 8m.
			Retrabalhados	Vales e encostas com decl. >5%	Permeabilidade média a alta, varia entre e 10^{-2} e 10^{-3} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura de 5 a 8m.
	Cretácio Terciário	Formação Itaqueri	Residuais (indiscr.)	Topos com declividade < 20%	Permeabilidade baixa, varia entre e 10^{-5} e 10^{-7} cm/s. Textura argilo-siltosa. Erodibilidade baixa; Espessura < 1,5m
	Jura-Cretáceo	Formação Serra Geral	Residuais espessos	Topos planos Declividade > 15%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura > 1m.
			Residuais rasos	Encostas íngremes Declividade > 15%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura argilo-siltosa. Erodibilidade baixa; Espessura > 1m.
			Retrabalhados	Encostas Decl. 5 a 15 %	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura argilo-arenosa. Erodibilidade baixa; Espessura > 4m.

Quadro 6 -Unidades do mapa de materiais inconsolidados (Conclusão)

Origem geológica			Classes	Relevo	Características
		Formação Botucatu	Residuais espessos	Topos com declividade < 15%	Permeabilidade média a alta, varia entre e 10^{-2} e 10^{-3} cm/s. Textura argilo-siltosa. Erodibilidade baixa; Espessura > 1m, com média > 4m.
			Residuais rasos	Encostas com Declividade >15 %	Permeabilidade média a alta, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura < 1m.
PALEOZÓICO	Triássico	Formação Pirambóia	Residuais	Encostas com declividade >20%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura < 1m e ocorrência muito baixa na região.
			Retrabalhados	Vales e encostas com decl. < 20%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura arenosa. Erodibilidade alta; Espessura $\cong$ 2m.
	Permiano	Formação Corumbataí	Residuais	Topos com declividade < 10%	Permeabilidade média, varia entre e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Textura argilo-siltosa. Erodibilidade baixa; Espessura < 1m.
			Retrabalhados	Vales e encostas com decl. >10%	Permeabilidade média a baixa, varia entre e 10^{-3} e 10^{-5} cm/s. Textura argilo-siltosa. Erodibilidade média; Espessura entre 1 e 4 m.

Fonte: Adaptado de Feres (2002).

3.5 PEDOLOGIA

A formação dos solos depende de alguns fatores com o material de origem, as condições climáticas, os organismos vivos, o relevo e o tempo de exposição dos materiais aos processos de intemperismo (MORAES, 2003).

Os solos presentes na BHRB de acordo com o Instituto Florestal (2017) são: Neossolo Litólico e Neossolo Quartzarênicos (Neossolos), Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho (Latossolos), Argissolos Vermelho-Amarelo e Vermelho (Argissolos), Gleissolos Háplicos (Gleissolos) e Organossolos Háplicos (Organossolos) (Figura 7). A

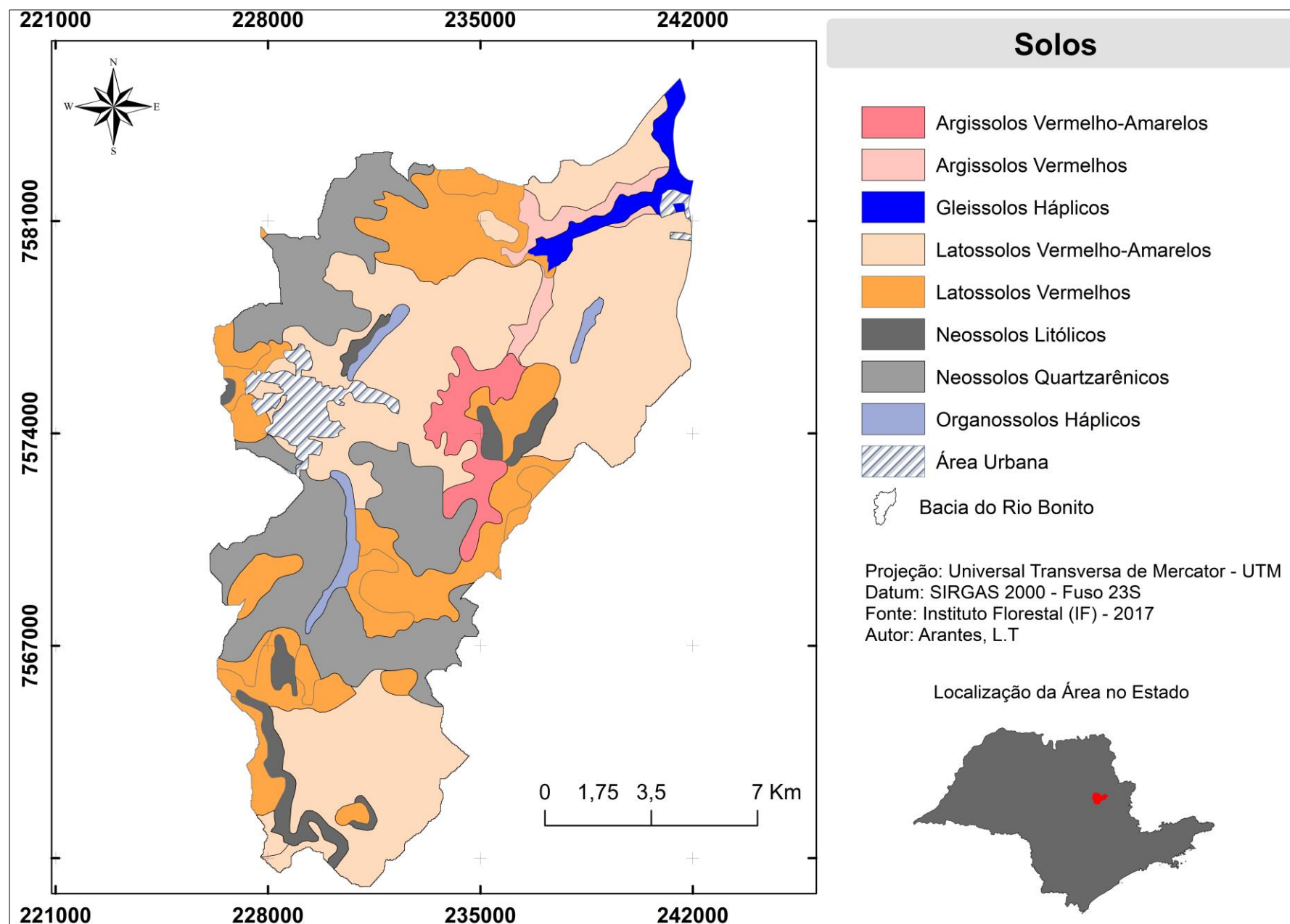
seguir é apresentado a legenda das unidades de mapeamento com sua descrição da área de estudo (Quadro 7).

Quadro 7 - Classes e descrição dos solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Bonito

Classes	Subordem	Descrição	Limitações
Argissolos	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	Distrófico espessoarênico abrupto, A moderado, textura arenosa/média, álico, fase relevo ondulado	Apresentam erosão moderada à forte, de acordo com o relevo e posição na paisagem
	ARGISSOLO VERMELHO	Eutrófico típico A moderada textura média/argilosa, fase relevo suave ondulado.	
Gleissolos	GLEISSOLO HÁPLICO	Eutrófico típico A moderado textura argilosa, fase relevo plano.	Solos pouco desenvolvidos, relativamente rasos, e apresentam topografia muito plana, apresentando excesso de água.
Latossolo	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	Distróficos típicos, A moderado ou fraco, textura média, álico ou não álico, fase relevo suave ondulado e ondulado.	Possui baixa fertilidade, com alta saturação em alumínio, o que dificulta sua correção para o uso agrícola e reduz a capacidade de retenção de água.
	LATOSSOLO-VERMELHO	A moderado, textura argilosa ou muita argilosa	Possui uma boa drenagem interna, isto é, baixa capacidade de retenção hídrica.
Neossolo	NEOSSOLO LITÓLICO	Eutrófico típico, A moderado ou chernozêmico, textura argilosa ou muito argilosa, fase substrato basalto/diabásio, relevo regional ondulado local escarpado	Ainda, por tratar-se de um solo jovem e pouco evoluído, são bastantes susceptíveis aos processos de erosão laminar.
	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	Hidromórfico típico álico A moderado, fase relevo suave ondulado	Apresentam limitação à capacidade de armazenamento de água disponível, devido à grande quantidade de areia, além disso, apresenta alta erodibilidade.
Organossolo	ORGANOSSOLOS HÁPLICOS	Sápico típico, fase relevo plano	Áreas de baixadas, úmidas ou alagadas, mal e muito mal drenadas.

Fonte: Adaptado de Rossi (2017).

Figura 7 - Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito



4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos para obtenção dos índices que expressam os limiares críticos para o desencadeamento dos processos erosivos, baseou-se em quatro etapas distintas, conforme ilustra o fluxograma (Figura 8). Os materiais utilizados e a descrição de cada etapa seguem definidos nos próximos subitens.

4.1 ETAPA1: PROCEDIMENTOS PREMILIMINARES

4.1.1 Definição da área de estudo

A escolha desta bacia foi motivada por estar localizada em uma região com alta intensidade de processos erosivos, baseado na distribuição espacial de processos erosivos que foram mapeados pelo IPT (IPT, 2012).

Além disso, foi adotado como critério na seleção da área, o fato de haver trabalhos previamente desenvolvidos na BHRB, possibilitando assim a caracterização mais detalhada da área e favorecendo o desenvolvimento da pesquisa.

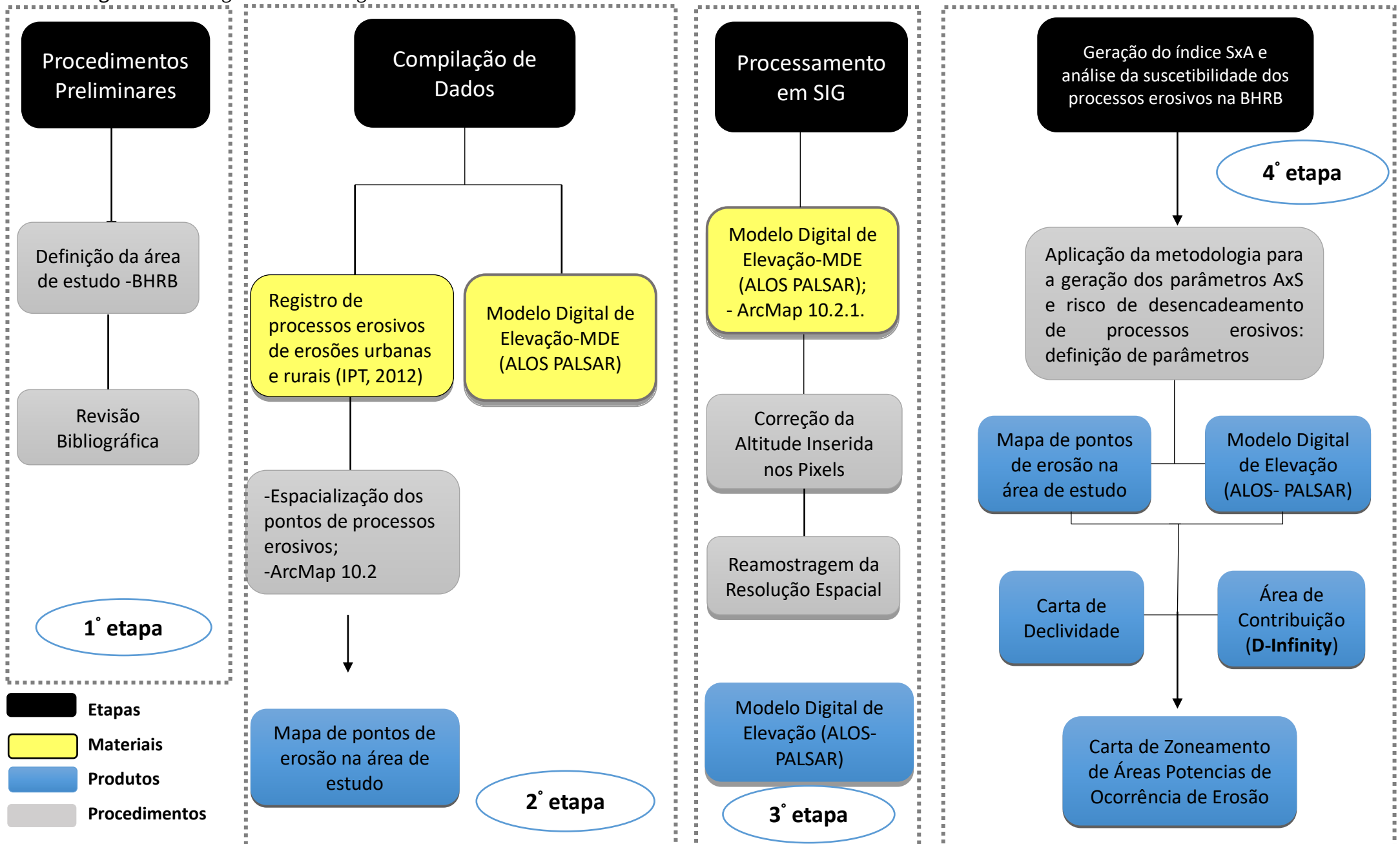
4.1.2 Revisão Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica objetivou a coleta de informações referentes ao tema central da dissertação, acerca de trabalhos que abordam conceitos importantes sobre processos erosivos, fatores controladores que podem gerar o desencadeamento dos processos erosivos e os métodos para a avaliação das áreas susceptíveis a ocorrência de erosão.

4.2 ETAPA 2: COMPILAÇÃO DE DADOS

Esta etapa compreendeu no levantamento de dados necessários para a obtenção dos índices para a geração da carta de zoneamento.

Figura 8 - Fluxograma metodológico das atividades



4.2.1 Registro de processos erosivos urbanos e rurais

A base de dados de registro de processos erosivos da área de estudo foi elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2012) em parceria com o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), permitindo caracterizar ravinas e boçorocas e a forma de ocorrência, assim como relacionar os principais fatores condicionantes do meio físico.

Nessa etapa é importante ressaltar que não houve participação da autora no levantamento de campo referente a identificação e mapeamento das feições erosivas. Na área de estudo, isto é, na BHRB, o levantamento realizado pelo IPT cadastrou 44 feições erosivas, dos quais 4 feições estão localizadas na área urbana e o restante dos pontos situados em áreas rurais (Tabela 1).

Tabela 1- Dados das feições erosivas cadastradas pelo IPT para a BHRB (Continua).

Feição	Latitude	Longitude	Município	Agente desencadeador
1	-21,839085	-47,581963	Descalvado	Escoamento Superficial
2	-21,853233	-47,564524	Descalvado	Escoamento Superficial
3	-21,863581	-47,607425	Descalvado	Escoamento Superficial
4	-21,869278	-47,613245	Descalvado	Escoamento Superficial
5	-21,866553	-47,589493	Descalvado	Escoamento Superficial
6	-21,877217	-47,564112	Descalvado	Escoamento Superficial
7	-21,882053	-47,555217	Descalvado	Escoamento Superficial
8	-21,900273	-47,583594	Descalvado	Escoamento Superficial
9	-21,905642	-47,555325	Descalvado	Escoamento Superficial
10	-21,909345	-47,55978	Descalvado	Escoamento Superficial
11	-21,904935	-47,577261	Descalvado	Escoamento Superficial
12	-21,909709	-47,579971	Descalvado	Escoamento Superficial
13	-21,918345	-47,602239	Descalvado	Escoamento Superficial
14	-21,921107	-47,589872	Descalvado	Escoamento Superficial
15	-21,918033	-47,581656	Descalvado	Escoamento Superficial
16	-21,914906	-47,548082	Descalvado	Escoamento Superficial
17	-21,924443	-47,568464	Descalvado	Escoamento Superficial
18	-21,922627	-47,573891	Descalvado	Escoamento Superficial
19	-21,930867	-47,582577	Descalvado	Escoamento Superficial
20	-21,940206	-47,594473	Descalvado	Escoamento Superficial
21	-21,94104	-47,591403	Descalvado	Escoamento Superficial
22	-21,954301	-47,570674	Descalvado	Escoamento Superficial
23	-21,947247	-47,591439	Descalvado	Escoamento Superficial
24	-21,97844	-47,571507	Descalvado	Escoamento Superficial
25	-21,980744	-47,573888	Descalvado	Escoamento Superficial

Tabela 2- Dados das feições erosivas cadastradas pelo IPT para a BHRB (Conclusão)

Feição	Latitude	Longitude	Município	Agente desencadeador
26	-21,975607	-47,583984	Descalvado	Escoamento Superficial
27	-21,984666	-47,609139	Descalvado	Escoamento Superficial
28	-21,981739	-47,58955	Descalvado	Escoamento Superficial
29	-21,986699	-47,588387	Descalvado	Escoamento Superficial
30	-21,980513	-47,583887	Descalvado	Escoamento Superficial
31	-21,994776	-47,587354	Descalvado	Escoamento Superficial
32	-22,001289	-47,582815	Descalvado	Escoamento Superficial
33	-22,013523	-47,605359	Descalvado	Escoamento Superficial
34	-22,027853	-47,637096	Descalvado	Escoamento Superficial
35	-22,026589	-47,608263	Descalvado	Escoamento Superficial
36	-22,040662	-47,604445	Descalvado	Escoamento Superficial
37	-22,041789	-47,631235	Descalvado	Escoamento Superficial
38	-21,84857	-47,547931	Porto Ferreira	Escoamento Superficial
39	-21,850955	-47,54417	Porto Ferreira	Escoamento Superficial
40	-21,850722	-47,53763	Porto Ferreira	Escoamento Superficial
41	228114	7575409	Descalvado	Lançamento De Águas Pluviais
42	227969	7575612	Descalvado	Escoamento De Água Pluvial
43	231481	7574914	Descalvado	Lançamento E Escoamento Das Águas Pluviais
44	229781	7573871	Descalvado	Lançamento Pluvial Urbano

*As coordenadas 41,42,43 e 44 estão localizadas na área urbana, sendo estas representadas em projeção UTM.

Fonte: Adaptado IPT (2012).

A feição erosiva em área urbana trata-se do processo que é desencadeado pela ação das águas pluviais urbanas, decorrente do crescimento acelerado da área urbana sem planejamento da drenagem e parcelamento do solo adequado, resultando em fluxos concentrados das águas pluviais.

Neste caso, o método adotado pelo IPT para o cadastramento das feições erosivas segue algumas etapas: inicialmente é efetivada a observação utilizando imagens orbitais para a identificação dos processos erosivos, feito isso, são elaboradas as fichas de cadastro das feições, em seguida, são efetivadas as visitas nessas áreas, e por fim, a compilação dos dados obtidos e comparação dos resultados.

Já em relação ao método adotado para o registro dos processos rurais, o mesmo procedimento foi seguido, porém, sem as etapas de visitas de campo e uma quantidade menor de informações na ficha de cadastro das feições.

Partindo desse pressuposto, a partir dos registros dos processos rurais cadastrados pelo IPT, deu-se início à fase de identificação dos processos erosivos por meio das imagens de alta resolução. Para isso, foi utilizado o Google Earth Pro, que dispõe de uma série histórica de imagens, em conjunto com as Ortofotos disponibilizadas de forma gratuita em uma plataforma online pela Emplasa (2010/2011), com resolução aproximada de 1 metro, recobrando todo o estado de São Paulo.

Deste modo, foi possível identificar as feições erosivas e, principalmente, ver se a localização do ponto cadastrado do IPT encontra-se exatamente na cabeceira da erosão, por meio da inspeção visual, permitindo assim ter uma maior confiabilidade das informações a serem empregues para a obtenção do limiar crítico para o desencadeamento dos processos erosivos.

4.2.2 Espacialização dos dados

A base de dados disponibilizada pelo IPT possui algumas informações referentes a cada ponto de erosão cadastrado coletadas a partir de GPS ou via imagens de satélite georreferenciadas, estando em formato de planilhas eletrônicas. Inicialmente foi necessário realizar a transformação de coordenadas, visto que a mesma estava em coordenadas geográficas (grau, minuto e segundo) com referência ao Datum WGS84, foi feita a transformação para um sistema de coordenadas baseado no plano cartesiano (eixo x e y), isto é, para UTM em SIRGAS 2000.

A definição da escolha do sistema de projeção utilizado justifica-se pela necessidade dos processos de geração de dados e o manuseio das bases cartográficas em sistemas de referência estarem com projeções UTM. Assim, o sistema de projeção utiliza o metro (m) como unidade para medir distancias e determinar a posição de um objeto, possibilitando também a geração de dados referente a área.

O primeiro passo para a construção do modelo foi a definição da topologia a ser aplicada para representar os pontos de erosão, para facilitar a visualização e identificação dos dados no *software*. As informações cartográficas obtidas foram organizadas em *layers*, em um arquivo no formato *shapefile* e, em seguida, foi feita a espacialização dos pontos de todas as feições erosivas, por meio do software ArcMap.

4.2.3 Imagem de satélite

Pesquisas recentes têm sido desenvolvidas no aspecto de verificar a qualidade altimétrica dos MDEs para diversas áreas que necessitam dessas informações. Neste cenário, em um trabalho efetivado por Rocha *et al.* (2017) com o intuito de comparar os resultados gerados por MDEs obtidos a partir do SRTM, ALOS e IBGE com o LIDAR, considerado como referência. Os resultados apontam que os produtos do MDE gerado pelo ALOS/PALSAR aproximaram quantitativamente e qualitativamente (geometria das curvas de nível) do LIDAR, apresentando assim um melhor produto final quando comparado aos dos outros MDEs.

Nesse contexto, foi utilizada imagem de radar do sensor **PALSAR** (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) do satélite **Alos** (*Advanced Land Observing Satellite*), disponibilizada de forma gratuita no banco de dados da Alaska Satellite Facility (UAF/NASA). Sendo necessária apenas uma cena para abranger a área de estudo, com data de imageamento em 13 de novembro de 2010, disponibilizada no modo de imageamento FBD (*Fine Beam Dual*), em polarizações HH e HV, com uma resolução espacial de 12,5m.

Desta forma, fundamenta-se a escolha desse satélite pela possibilidade de aquisição dos dados de forma gratuita e, principalmente, por ter se mostrado ser um MDE que apresenta bons resultados na geração dos produtos dependentes da qualidade altimétrica.

4.3 ETAPA 3: PROCESSAMENTO EM SIG

Esta etapa compreende e duas etapas que foram adotadas para a correção de erros de altitude em MDE, tornando-o mais consistente e confiável para aplicações, como na delimitação de bacias hidrográficas e geração de drenagem.

4.3.1 Correção da Altitude Inserida nos Pixels

Alguns Modelos Digitais de Elevação, disponibilizados de forma gratuita, apresentam erros em sua geração, como é o caso do Alos/ Palsar, gerando depressões e áreas planas incompatíveis com a morfologia real no terreno. Ainda, segundo Chagas *et al.* (2010), caso não seja realizado o preenchimento prévio destas falhas, pode-se gerar uma rede de drenagem descontínua, inviabilizando uma análise hidrológica utilizando esses dados.

Deste modo, a primeira etapa realizada refere-se à aplicação de um filtro no MDE, com o intuito de preencher essas áreas (preenchimentos de sinks), denominadas “sinks”, isto é, uma área rodeada por elevações com valores de cotas superiores, que pode ser associada a uma depressão, visando a geração de um mapa de direção de fluxo consistente.

A correção desses erros presentes no MDE do ALOS Palsar foi realizada por meio de uma ferramenta disponível no *software* ArcGIS, em algumas etapas, utilizando a ferramenta **Fill** (*ArcToolBox > Spatial Analyst Tool > Hydrology*) que atribui novos valores aos *pixels* com anomalias, considerando as informações dos vizinhos mais próximo gerando um novo MDE.

4.3.2 Reamostragem da Resolução Espacial

A seleção de uma resolução apropriada depende das características da área de estudo, como complexidade topográfica, natureza da análise e recursos disponíveis para aquisição de dados MDE de alta resolução, se apropriado.

De acordo com Sorensen e Seibert (2007), a resolução do MDE interfere expressivamente na obtenção de parâmetros como a área de contribuição, que apresentam relação direta com o tamanho do pixel, já que os valores do fluxo acumulado são calculados pixel a pixel, desta forma, perdas de informações hidrológicas podem ocorrer dependendo da escala utilizada.

Nesse contexto, após realizar a correção dos valores dos *pixels*, foi realizada a reamostragem da resolução espacial, com o intuito de melhorar a resolução espacial do DEM, de 12,5 m para 2 m, para a obtenção dos parâmetros. Inicialmente foi necessário gerar as curvas de nível, neste caso foi utilizado o *software* Global Mapper, considerando uma equidistância das curvas de nível de 5 metros, em seguida, esse arquivo foi exportado para o formato *tiff*, sendo este o formato compatível com o *software* ArcMap.

Por fim, foi realizada a interpolação baseado no método Topo to Raster, disponível no ArcMap, por meio da ferramenta **Topo to Raster** (*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation*) para a geração do MDE, utilizando os dados altimétricos e a hidrografia.

O interpolador Topo to Raster, foi desenvolvido por Hutchinson, na Austrália, e é baseado no algoritmo ANUDEM (Australian National University's Digital Elevation Model), desenvolvido especialmente para a geração de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, baseado nos seguintes dados de entrada: curvas de nível, pontos cotados e linhas de hidrografia (HUTCHINSON *et al.*, 1989).

4.4 ETAPA 4: GERAÇÃO DO ÍNDICE SXA E ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA BHRB

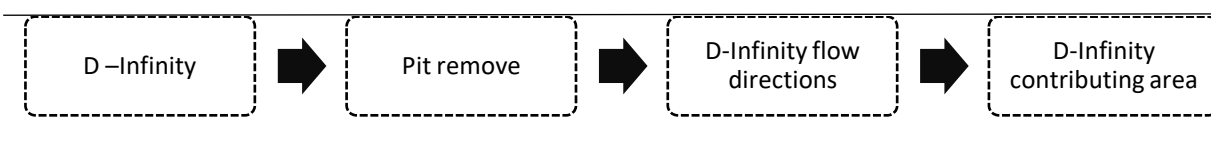
Nesta etapa foram gerados os índices de declividade (S) *versus* área de contribuição (A), gerados de forma automática no *software* ArcMap, considerando os pontos de cabeceira das erosões, a partir do uso de dados de radar e dos cálculos no SIG.

4.4.1 Área de contribuição

A obtenção das áreas de contribuição foi realizada em algumas etapas, conforme o fluxograma da Figura 9. Foi utilizado o algoritmo *D-Infinity* (Método da direção do fluxo) proposto por Tarboton (1997), permitindo a obtenção de infinitas possibilidades de direção de fluxo de água.

Nesta operação, a partir do mapa de direção de fluxo, são geradas as áreas de contribuição para cada ponto, neste caso, para pontos de cabeceira de erosão. Para isso, será utilizado o *plugin* TauDEM 5.3 (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), desenvolvido na Utah State University (USU, 2018), como extensão do *ArcToolbox*.

Figura 9 – Etapas para a elaboração do mapa de área de contribuição



Fonte: Próprio Autor.

Segundo Oliveira *et al.* (2010), algumas depressões (*sinks*) são provenientes de erros introduzidos também durante o processo de interpolação dos dados, enquanto outras referem-se as feições reais da topografia.

Assim sendo, para corrigir essas possíveis depressões existentes no MDE gerado após o processo de interpolação, utilizou-se a ferramenta **Pit Remove** (*ArcToolbox* > *TauDEM Tools* > *Basic Grid*), que considera as altitudes das células vizinhas para preencher essas áreas.

Posteriormente, obteve-se o mapa de direção de fluxo de água na rede de drenagem por meio da ferramenta **D-Infinity Flow Direction** (*ArcToolbox* > *TauDEM Tools* > *Basic Grid Analysis*).

Com o uso do *raster* contendo a direção de fluxo, é possível gerar as áreas de contribuição para cada ponto de erosão, utilizando como *inputs* o *raster* de direção de fluxo e o ponto de cabeceira das feições, e a ferramenta ***D-Infinity Contribution Area*** (*ArcToolbox > TauDEM Tools > Basic Grid Analysis*). Por fim, as áreas geradas foram convertidas para o formato *shapefile* (*ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*).

4.4.2 Carta de declividade

Para esse importante índice morfométrico, foram adotadas as classes de declividade definidas conforme a classificação realizada por Gomes (2002), estabelecidas em função das características do terreno (Quadro 8).

Quadro 2- Definição das classes de declividade em porcentagem variando em função das características do local

Classes (%)	Características
0 - 2	Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento.
2 - 5	Terrenos com declividades suaves, nos quais, na maior parte do solo, o escoamento superficial é lento ou médio e os problemas de erosão requerem práticas simples de conservação.
5 - 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial.
10 - 15	Terrenos muito inclinados, ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam problemas de erosão superficial, exceto quando ocorrem em solos permeáveis e pouco arenosos
15 - 20	Terrenos inclinados onde o escoamento superficial é rápido, com problemas de erosão superficial.
20 - 25	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido, susceptível a ocorrência de processos erosivos
25 - 50	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido, susceptível a ocorrência de processos erosivos
> 50	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com desenvolvimento de solo raso a muito raso. Susceptível a ocorrência de processos erosivos, sujeitos a movimentos de massa e queda de blocos.

Fonte: Gomes (2002).

A carta de declividade foi elaborada por meio da ferramenta ***Slope*** (*ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Raster Surface*), utilizando o *raster* obtido na etapa 4.3 com a resolução espacial de 2 m. Em seguida, a partir da carta de declividade deverá ser efetivado um recorte com a ferramenta ***Clip*** (*ArcToolbox > Data Management Tools > Raster > Raster Processing*) levando em consideração a área de contribuição de cada feição, a fim de obter o valor da declividade média.

4.4.3 Relação entre Declividade (S) versus Área de Contribuição (A)

Os parâmetros de declividade média (S) e área de contribuição (A) foram obtidos partir dos mapas que foram elaborados na etapa 4.2. O arquivo *raster* contendo o fluxo acumulado foi convertido para o formato “*shapefile*” e as respectivas áreas calculadas em hectares (ha), possibilitando assim efetivar-se o cálculo das áreas de contribuição para cada ponto. Para a obtenção dos dados de declividade média das áreas de contribuição de cada ponto de cabeceira, foi utilizado o recorte na Carta de Declividade realizado na etapa anterior, em seguida, foi realizada a conversão dos valores que estavam em porcentagem (%) para a unidade $m.m^{-1}$, apenas dividindo o valor da declividade média em % por 100 como na Equação 1.

$$S(m.m^{-1}) = S(\%) \div 100 \quad (1)$$

Os dados da área de contribuição para cada feição obtida estavam na unidade de metro quadrado (m^2) foi transformado em hectare (ha), como na Equação 2.

$$A(ha) = A(m^2) \times 0,0001 \quad (2)$$

Tais conversões foram realizadas decorrente de trabalhos nacionais e internacionais apresentarem a relação entre A *versus* S, possibilitando assim realizar a comparação dos dados obtidos nesse trabalho com outros desenvolvidos em outras regiões.

Assim, para definir os limiares críticos a partir da relação SxA, conforme proposto por Patton e Schum (1975), descrito na **Equação 3** foi utilizado o Excel. Os parâmetros (SxA) de cada uma das feições foram plotados no plano cartesiano e, em seguida, realizou-se o cálculo da linha de regressão, com a função potência (*Power Function*).

$$S = a \cdot A^{-b} \quad (3)$$

Por fim, foi realizado o ajuste de forma empírica da linha de regressão para o limiar inferior dos dados obtidos, representando o limite crítico das feições. Após obter a equação da

reta, calculou-se um novo coeficiente “a” considerando as coordenadas do ponto mais próximo do limiar crítico.

4.4.4 Zoneamento de áreas críticas de processos erosivos

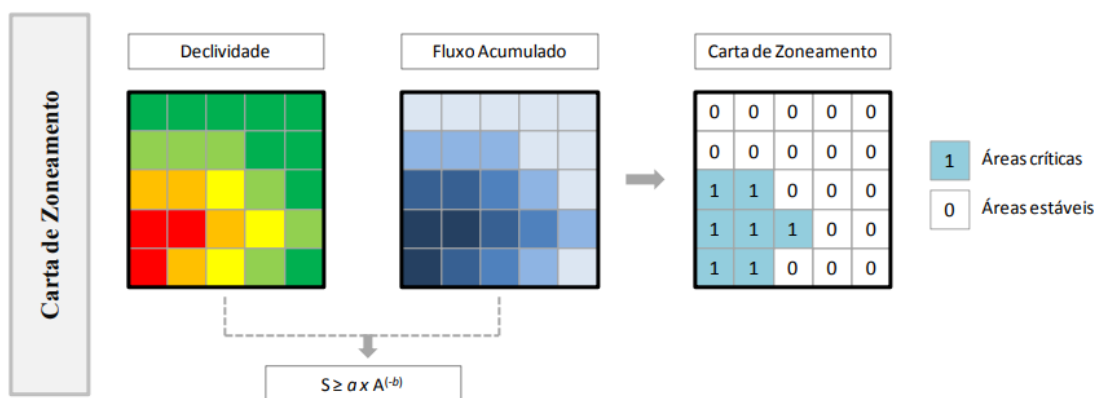
A partir dos índices de A x S foi gerado a carta de zoneamento de áreas de ocorrência de processos erosivos a partir dos índices SxA. Para a elaboração desta carta foi utilizada a ferramenta “Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator”, que permite a aplicação de expressões algébricas em arquivos matriciais.

A Equação 3 mostra a expressão utilizada por Neves (2017) para a geração da carta de zoneamento, empregando a carta de declividade e o mapa de direção de fluxo acumulado que foram utilizados como parâmetros. O resultado do processamento consiste em um raster com valores dos pixels que variam de 0 a 1, em que os pixels com valor igual a 0 estão abaixo do limiar crítico, e os pixels com valores iguais a 1 estão acima do limiar crítico, isto é, são as áreas críticas onde ocorrerá a formação de canais de erosão (NEVES, 2017).

$$\text{declividade} \geq a * (\text{fluxoacumulado} ** (-b)) \quad (3)$$

A Figura 10 ilustra o processamento para a elaboração da carta de zoneamento, sendo cada pixel representado pela relação entre a declividade e o fluxo acumulado em formato matricial.

Figura 8- Processamento para elaboração da carta de zoneamento.



Fonte: Neves (2017).

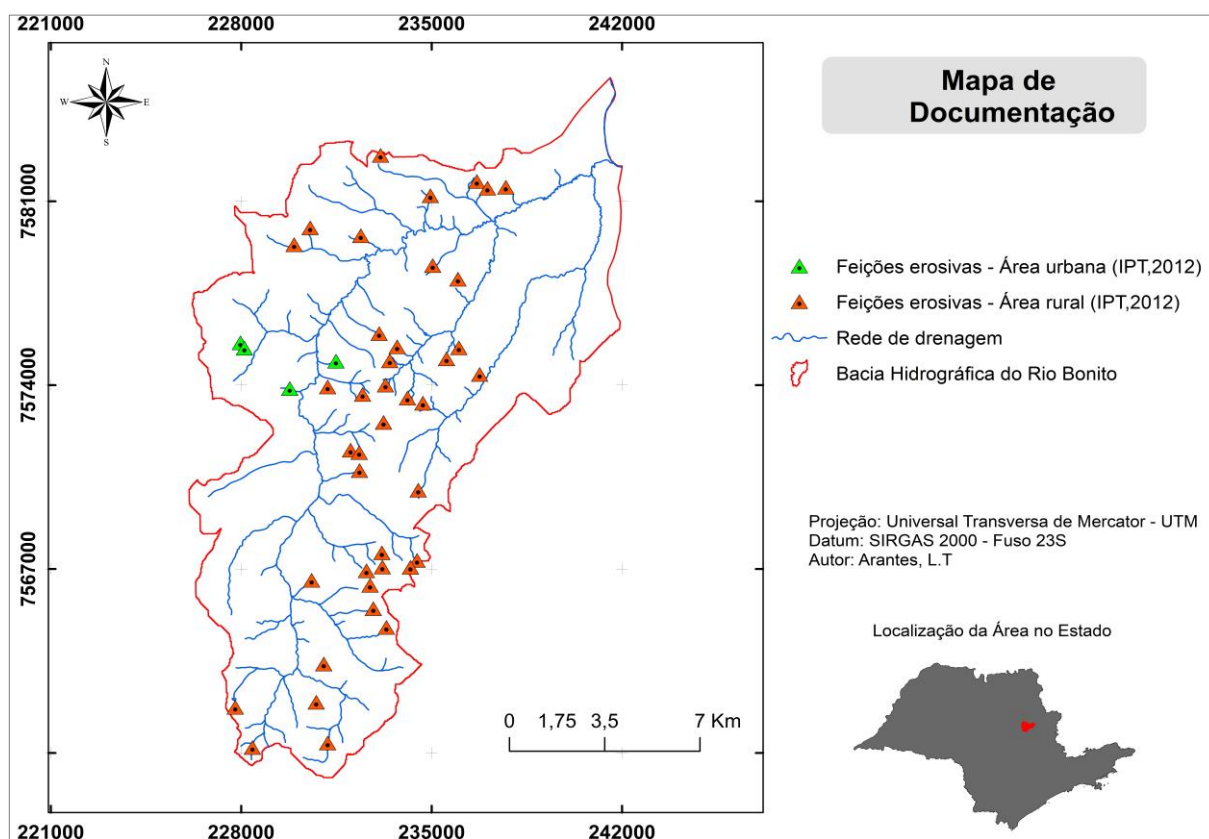
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte dos resultados refere-se aos os mapeamentos das variáveis analisadas necessárias para a geração do modelo proposto de susceptibilidade à erosão, obtidos a partir do processamento utilizando o SIG, incluindo o MDE, Mapa de Declividade e Mapa de direção de fluxo e fluxo acumulado da Bacia Hidrográfica do Rio bonito. Na segunda parte são apresentados os resultados referentes ao objetivo geral do trabalho, isto é, a geração do índice e SxA, da análise propriamente dita, e da carta de zoneamento de áreas de ocorrência de processos erosivos.

5.1 IVENTÁRIO DAS FEIÇÕES EROSIVAS

Nesse item é apresentado o mapa de documentação de algumas informações que foram reunidas ao longo do trabalho para a Bacia Hidrográfica do Rio Bonito, como pode ser observado na Figura 11 possibilitando observar a distribuição espacial das erosões.

Figura 11- Mapa de documentação da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito



A Tabela 2 apresenta algumas informações referentes aos pontos de erosão utilizados na elaboração do Mapa de Feições Erosivas, como sua classificação quanto ao tipo de feição, área de contribuição, declividade média, tipo de agente desencadeador e também as coordenadas planimétricas da cabeceira das mesmas.

Tabela 3 - Dados e características das erosões mostradas no Mapa de Feições Erosivas
(Continua)

Feição	X (UTM)	Y (UTM)	A (ha)	S (%)	Agente Desencadeador
1	233122,2	7582746	0,191507	6,3715	Escoamento superficial
2	234951,73	7581209	0,041474	5,4357	Escoamento superficial
3	230535,06	7579988	2,18728	5,4933	Escoamento superficial
4	229944,01	7579347	0,029472	5,6297	Escoamento superficial
5	232394,71	7579690	0,968639	8,144	Escoamento superficial
6	235038,64	7578553	1,03684	5,8392	Escoamento superficial
7	235967,15	7573707	0,103446	4,2295	Escoamento superficial
8	233067,45	7575966	0,003214	2,749	Escoamento superficial
9	235999,47	7575420	0,015238	5,8721	Escoamento superficial
10	235545,83	7575002	0,01933	5,1607	Escoamento superficial
11	233730,76	7575460	0,39864	5,5166	Escoamento superficial
12	231157,84	7574927	2,45905	7,7927	Escoamento superficial
13	231174,07	7573625	0,007168	3,6441	Escoamento superficial
14	232457,45	7573647	0,003712	3,1124	Escoamento superficial
15	233300,88	7574002	0,968322	9,3659	Escoamento superficial
16	236765,17	7574406	0,023426	3,729	Escoamento superficial
18	234111,98	7573506	0,485339	8,7639	Escoamento superficial
19	233229,63	7572579	0,183067	4,8373	Escoamento superficial
20	232017,72	7571523	0,003712	4,3562	Escoamento superficial
22	234503,31	7570003	1,583539	8,5551	Escoamento superficial
23	232344,45	7570749	0,0706	8,1063	Escoamento superficial
24	234462,16	7564797	2,42374	4,1001	Escoamento superficial
25	234220,46	7564793	0,113977	5,3806	Escoamento superficial
26	233167,83	7567620	0,691897	7,4214	Escoamento superficial
27	230586,05	7566573	0,090826	7,3868	Escoamento superficial
28	232604,28	7566931	0,37468	6,1914	Escoamento superficial
29	232733,73	7566384	1,243608	5,2805	Escoamento superficial
31	232855,58	7565491	8,0312	4,4204	Escoamento superficial
32	233336,65	7564778	0,003632	4,469	Escoamento superficial
33	231031,04	7561796	0,260878	5,2604	Escoamento superficial
34	227780,36	7561739	0,001256	3,7786	Escoamento superficial
35	230755,81	7561931	0,693004	9,7214	Escoamento superficial
36	231176,73	7560378	0,0036	3,9038	Escoamento superficial
37	228412,3	7560206	0,518698	11,4187	Escoamento superficial
38	236658,92	7581754	0,063372	6,1912	Escoamento superficial

Tabela 2 - Dados e características das erosões mostradas no Mapa de Feições Erosivas (Conclusão)

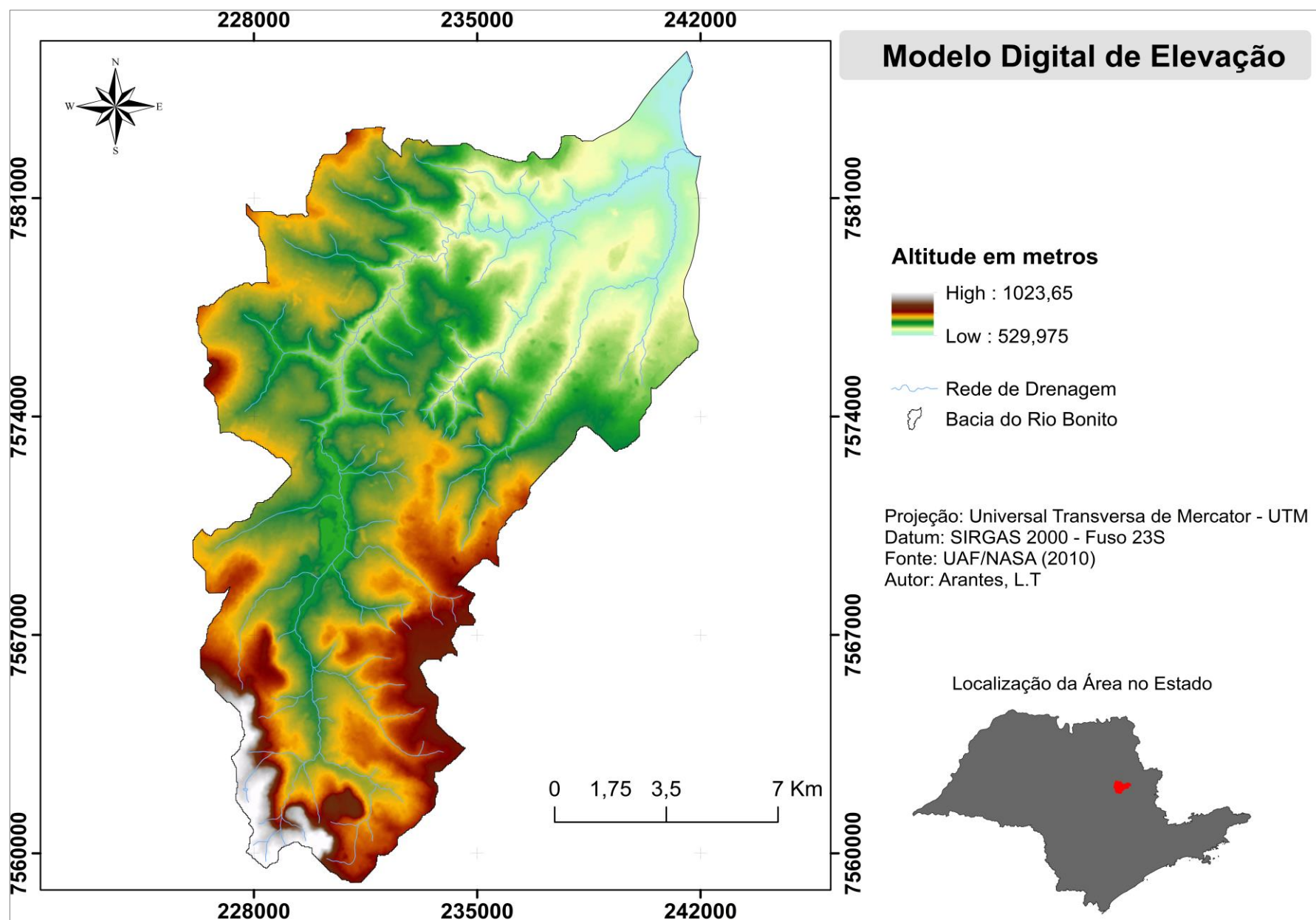
Feição	X (UTM)	Y (UTM)	A (ha)	S (%)	Agente Desencadeador
39	237052,19	7581496	0,0012	3,5413	Escoamento superficial
40	237728,02	7581533	0,041458	4,7412	Escoamento superficial
41	228114	7575409	0,177554	8,1101	Lançamento de águas pluviais
42	227969	7575612	0,32019	5,3288	Escoamento de água pluvial
43	231481	7574914	0,030746	2,41	Lançamento e escoamento das águas pluviais
44	229781	7573871	0,0012	7,4613	Lançamento pluvial urbano

Nota: Legenda: A – Área de contribuição; S – Declividade média

Fonte: Próprio autor.

5.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) representa as altitudes da superfície topográfica considerando os elementos geográficos existentes sobre ela. Foi gerado o modelo digital de elevação a partir da imagem de radar do satélite Alos /Palsar, com *pixel* de 2 metros. Para a representação da variação da altitude foi utilizado uma paleta de cores, sendo empregue cores quentes para representar as áreas mais elevadas do terreno e, para as áreas com altitude baixa, cores frias, com exceção das regiões com maiores altitudes, sendo representado na cor branca, como mostra a Figura 12. A partir da observação da topografia do terreno da Bacia do Rio Bonito, nota-se valores de elevada altitude (1023 metros) localizados na porção sudoeste da área de estudo, que se suaviza em direção nordeste até atingir as áreas de menores altitudes (529 metros).

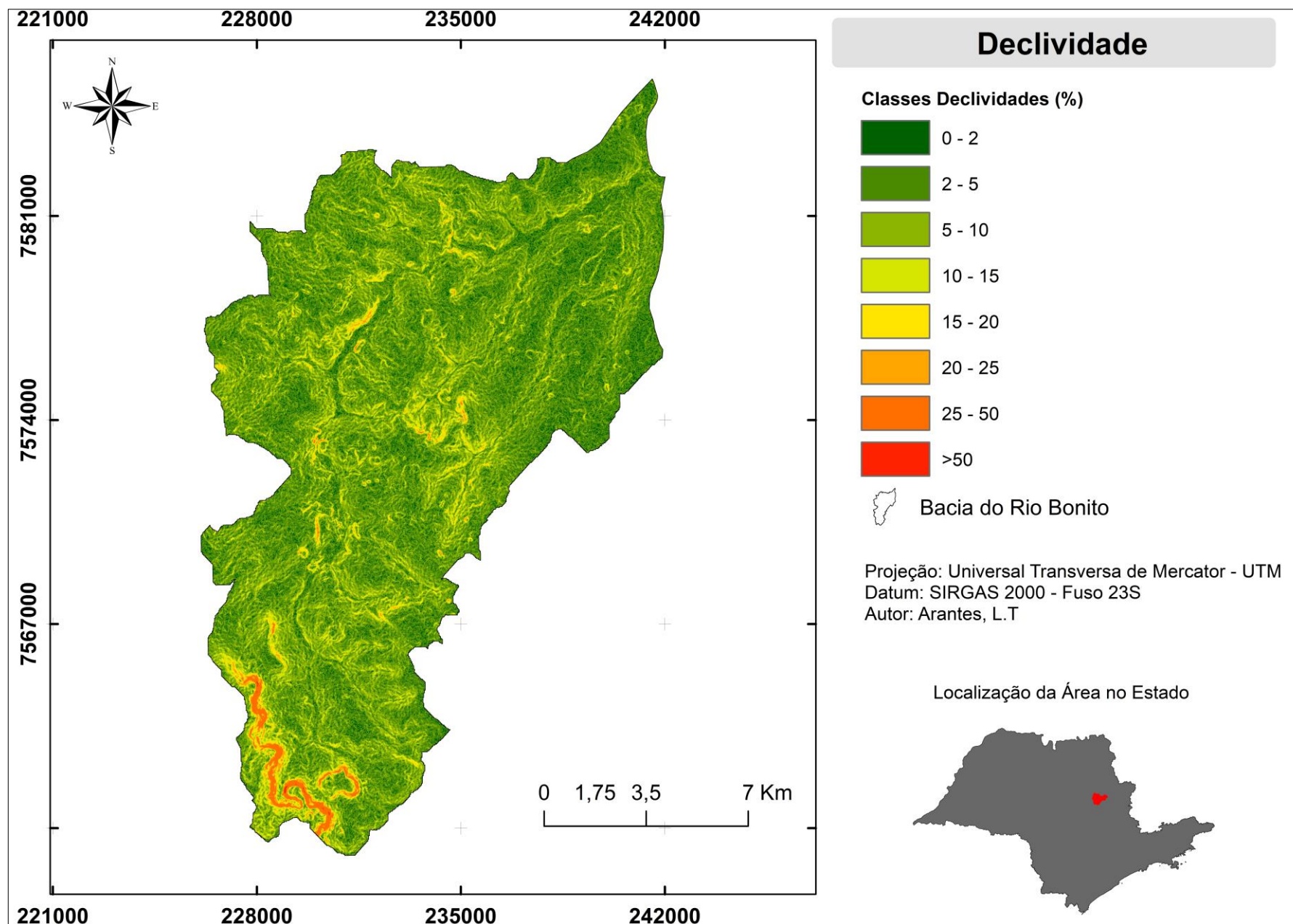
Figura 12 - Modelo Digital de Elevação da BHRB

5.3 CARTA DE DECLIVIDADE

A Carta de Declividade consiste em uma forma cartográfica de representação da inclinação do terreno em graus ou expressa em porcentagem. Basicamente consiste na relação entre a diferença de elevação entre dois pontos (dA) e a distância horizontal (dh) entre os mesmos.

Neste trabalho, foram definidas 8 classes de declividades, como realizado por Gomes (2002), considerando sua representação em porcentagem. Verifica-se que a classe de declividade predominante na Bacia do Rio Bonito se encontra no intervalo de declividades entre 2 e 5 %, caracterizando a maior parte da área com declividades suaves e escoamento superficial lento ou médio, requerendo práticas simples de conservação para problemas de erosão.

Considerando o declive do terreno, não se trata de uma área com uma susceptibilidade significativa, exceto, possivelmente, em encostas cujas rampas sejam muito longas somado ao tipo de solo do local, que pode apresentar características que o classifica como um solo altamente suscetível a ocorrência de erosão, além disso, deve ser levado em consideração possíveis escoamentos superficiais de maior densidade proveniente de áreas vizinhas situadas à montante e mais declivosas, podendo influenciar no desencadeamento do processo erosivo dessas áreas com pouco declive.

Figura 13 - Mapa de declividade da BHRB

Pela análise da Figura 13, pode-se perceber que apenas um pequeno trecho da porção sudoeste da BHRB encontra-se terrenos fortemente inclinados a muito íngreme ($>25\%$), com relevo ondulado e escoamento superficial rápido, que ocasionam problemas de erosão, que podem ainda ser agravados caso as características geológicas, pedológicas da área, uso e ocupação apresentem condições mais favoráveis a susceptibilidade a erosão.

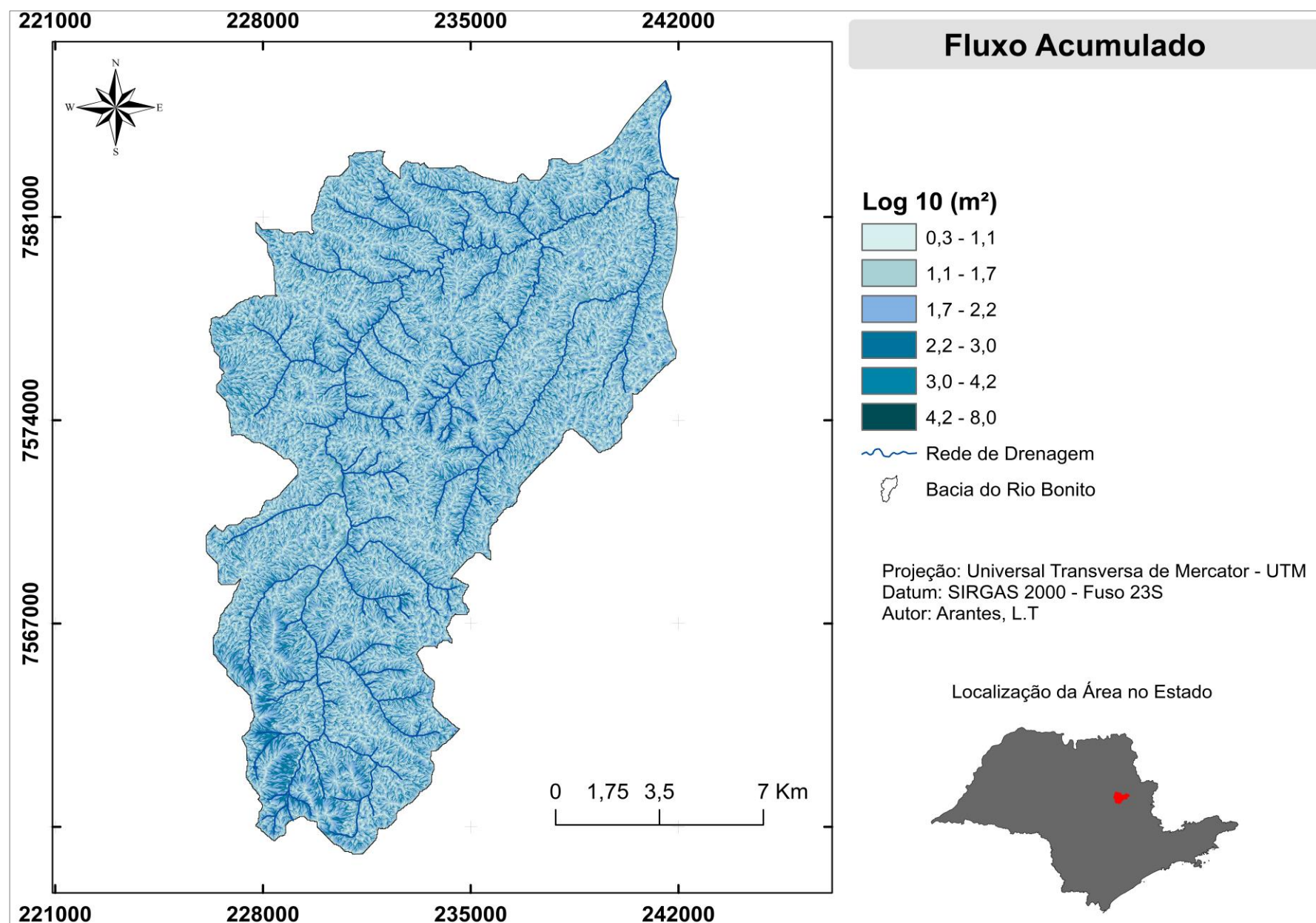
5.4 ASPECTOS HIDROLÓGICOS

A direção de fluxo define a trajetória dos caminhos preferenciais do fluxo, tanto de água como de sedimentos e nutrientes, em áreas adjacentes aos pontos com valores de altitudes menores em todas as posições na bacia hidrográfica.

O algoritmo D-Infinity permite determinar as direções de fluxo com uma maior exatidão, possibilitando uma análise mais consistente dos processos erosivos em concordância com as características física do meio.

A determinação das áreas de fluxo acumulado, as quais permitem a simulação da rede hidrográfica, são definidas com base exclusivamente na direção de fluxo. O mapa de direção de fluxo foi utilizado como parâmetro de entrada para a obtenção do fluxo acumulado, representando as áreas de acúmulo de água em uma região, esse processo compara cada pixel com seus oito vizinhos e determina, por meio da direção de fluxo, quantas células drenam da jusante para o exutório da bacia, permitindo a locação da rede de drenagem e a delimitação automática da bacia hidrográfica.

O mapa de fluxo acumulado representa as áreas de acúmulo de águas, determinada em função da quantidade de pixels que drenam da jusante para o exutório da bacia. Os valores de fluxo acumulado são apresentados em escala logarítmica, devido à grande variabilidade existente na distribuição dos dados, sendo divididos em 6 classes de área de contribuição para melhor visualização dos dados (Figura 14).

Figura 14 - Mapa de Fluxo Acumulado da BHRB

Foi possível observar a formação dos caminhos preferenciais de fluxo da água que originam a rede hidrográfica, além disso, as áreas que possuem uma maior área de contribuição, ou seja, valores altos, concentram-se geralmente nas porções mais baixas relevo, isto é, nas redes de drenagem, enquanto em áreas de interflúvios, geralmente concentram baixos valores de fluxo acumulado.

5.5 GERAÇÃO DOS ÍNDICES S X A

A análise do desencadeamento de processos erosivos na Bacia do Rio Bonito foi realizada considerando 41 pontos de feições erosivas, visto que na etapa 4.2.1 foi efetivada a identificação dos processos erosivos por meio de imagens de alta resolução. De tal modo, três dos 44 pontos cadastrados pelo IPT não foram identificados por meio da inspeção visual, além disso, os registros estavam localizados em áreas de declividades muito baixas, podendo contribuir na geração de erros na delimitação da área de contribuição para essas feições. Assim, os três pontos (17,21 e 30) foram desconsiderados na análise para a obtenção do limiar crítico, permitindo uma maior confiabilidade das informações.

Sendo a área de contribuição gerada a partir do ponto de cabeceira da erosão, obtidos pelo levantamento do IPT (2014); e a declividade obtida foi a média de cada área de contribuição de cada feição. Foram determinadas a área de contribuição (A) e declividade média (S) para cada feição erosiva.

O método utilizado consistiu em representar graficamente os valores de A e S. Neste gráfico, a linha que produz o melhor ajuste para a nuvem de pontos de feições erosivas representa o limiar topográfico médio (MORGAN; MNGOMEZULU, 2003).

A linha definida como o limiar crítico para o desencadeamento da erosão foi feita seguindo a metodologia proposta por Begin e Schumm (1979), em que paralelamente à linha limiar topográfica média, outra linha abaixo é desenhada no limite inferior dos dados na qual, o fundo do vale é estável e a incisão não acontece.

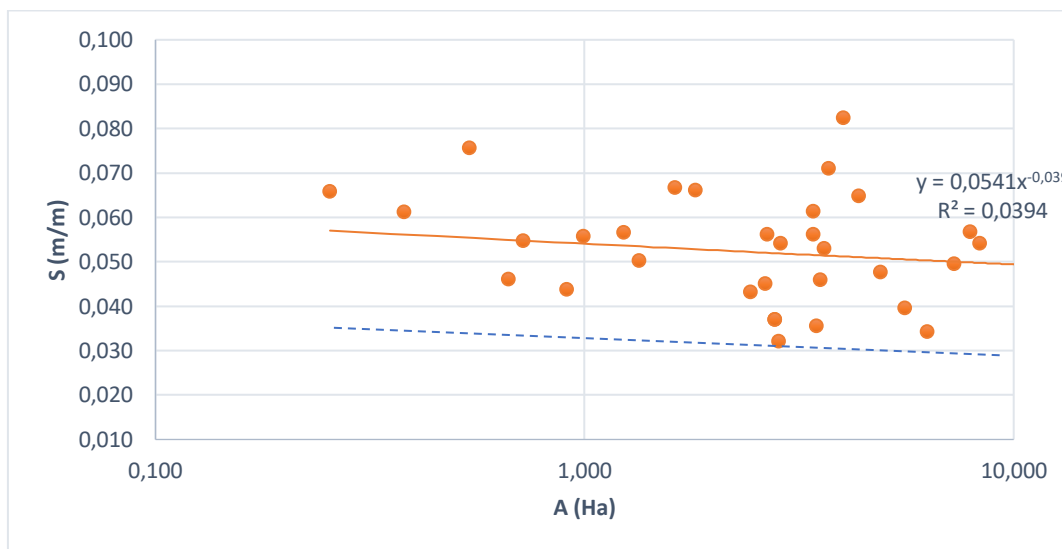
Considerando as feições selecionadas localizadas na BHRB realizou-se a análise de forma integrada com todos os dados com o intuito de definir um limiar crítico geral para a área em questão. O procedimento adotado para o cálculo do índice, assim como a delimitação da área de contribuição e declividade média está descrito o item 4.2.

A relação $S \times A$, obtida foi $S = 0.0333A^{-0.039}$, aplicando o índice obtido considerando uma área de contribuição de 1 ha (10.000 m²) a declividade crítica que levaria ao desencadeamento da erosão a partir dos dados de radar seria de 3,33 % (0,0333m/m),

demonstrando que o desencadeamento dos processos erosivos na Bacia do Rio Bonito acontece em áreas com declividade baixas, isto é, em terrenos suaves.

A Figura 15 apresenta o gráfico obtido a partir da relação SxA e o limiar para o desencadeamento do processo erosivo na BHRB.

Figura 15 - Gráfico SxA da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito.



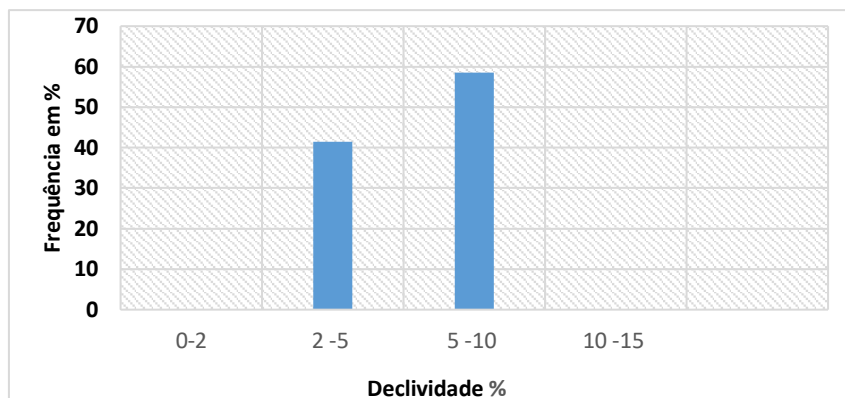
Fonte: Próprio autor.

O valor de R^2 (0,0394) obtido foi um valor baixo, o que pode ser justificado pelo fato de terem sido incluídas todas as feições da área de estudo, sem fazer distinção de características geomorfológicas e geológicas dos terrenos, as quais podem ser distintas.

Com relação as áreas de contribuição, os valores são predominantemente maiores que 1 hectare e apenas algumas apresentam áreas inferiores. Através do conjunto de dados analisados o coeficiente “b” obtido foi negativo, em consonância com outros trabalhos realizados na literatura, através da função potência no Excel, permitindo realizar uma análise comparativa com outros trabalhos já desenvolvidos. Consequentemente, a influência do fluxo subsuperficial enfraquece a tendência negativa implícita

Além disso, observa-se que as declividades médias para os canais em encostas estão entre 2 e 10%, podendo constatar que os locais com a presença de feições erosivas estão localizados em terrenos com declividades suaves a inclinado. A Figura 16 mostra a frequência de canais observados em relação à declividade para o índice obtido.

Figura 16 – Frequência da declividade das feições presentes na BHRB.



Fonte: Próprio autor.

O índice obtido para esse trabalho, pode ser aplicado para outras áreas que apresentam características referentes a geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, tipo de solo e condições climáticas semelhantes, assim sendo, caso seja desenvolvido um estudo em outra área que apresentam condições distintas, é necessário a obtenção de um novo índice levando em consideração as peculiaridades daquela região.

5.6 RELAÇÃO DOS ÍNDICES COM OS ATRIBUTOS AMBIENTAIS DA BHRB

No estudo desenvolvido por Vandekerckhove *et al.* (1998), foi demonstrado que a relação entre área de contribuição e declividade não podem explicar a iniciação da ravina de forma individual, sendo as variações dos limiares topográficos dependentes de outros fatores, como a vegetação, uso e ocupação da terra, tipos de solos e geologia.

Ainda, para Sala e Gaspereto (2010), condições ambientais como o tipo do solo e o grau de declividade do terreno, associados ao uso da terra na bacia hidrográfica, podem determinar o surgimento de vários tipos de processos erosivos.

Desta forma, considerando os registros de processos erosivos cadastrados pelo IPT (2014), com o intuito de identificar qual a classe mais predominante na ocorrência de processos erosivos, foi considerado alguns atributos ambientais para a análise: (1) o uso e ocupação do solo, (2) materiais inconsolidados e (3) pedologia, possibilitando a análise de possíveis condições contribuintes para o desencadeamento dos processos erosivos em áreas que apresentam declividades relativamente baixas.

Em um levantamento realizado por Poeson *et al.* (2003), no qual analisou os resultados obtidos em diferentes pesquisas que utilizaram a relação AxS para a obtenção do

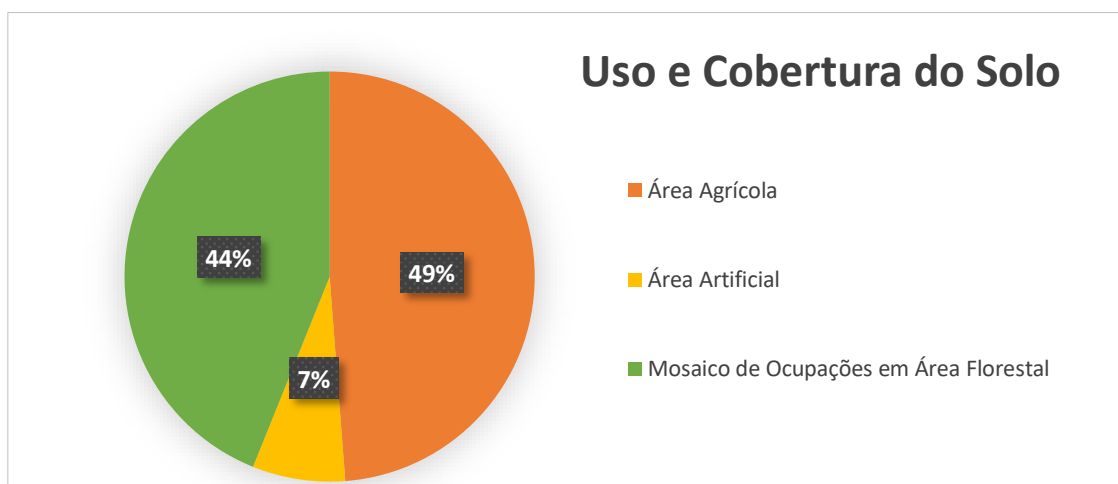
limiar topográfico, foi possível constatar a influência dos diferentes usos da terra na obtenção o limiar, isto é, para diferentes usos da terra os valores de A e S apresentaram variações distintas.

Partindo desse pressuposto inicialmente foi efetivada a análise considerando as diferentes classes de uso e ocupação do solo, a partir do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomass), referente ao ano de 2012, sendo o mesmo ano do levantamento das feições erosivas realizado pelo IPT, para a área de estudo, evidenciando que a maior parte dos processos erosivos (49%) ocorrem nas áreas com atividades agrícolas, sendo áreas de terras cultivadas, no qual encontram-se inserida as lavouras temporárias, lavouras permanentes, pastagens plantadas e silvicultura.

Cerca de 44% das feições estão localizadas em áreas de ocupações em área florestal, sendo está caracterizada por áreas que apresentam mais de 50% e menos de 75% do polígono ocupado com vegetação florestal e o restante ocupado por mosaicos de lavouras temporárias, irrigadas ou não, lavouras permanentes, pastagens e/ou silvicultura, isto é, associação de diversas modalidades de uso da terra e que devido à resolução espacial das imagens de satélite não é possível uma discriminação entre seus componentes.

Para a classe mosaico de área superficial que se refere a área urbana, onde predominam superfícies artificiais não-agrícola, apresentou porcentagem inferior (7%) de processos erosivos nessa classe decorrente da pequena quantidade de processos cadastrados pelo IPT na área urbana. O Gráfico 1 demonstra o percentual para cada classe de uso do solo.

Gráfico 1- Classes de uso e cobertura do solo e classificação de suscetibilidade à erosão.



Fonte: Próprio autor.

A região onde está inserida a BHRB tem sua economia com base na agropecuária, representada principalmente pelo cultivo de culturas permanentes e temporárias, como cultura de laranja, café, cana-de-açúcar e milho, e na atividade pecuária (IBGE, 2017).

Uma das principais formas de degradação dos solos em terras agrícolas no Brasil são a degradação física por práticas agrícolas, como a mecanização, que se vincula com o processo de compactação e selagem do solo (ARAÚJO *et al.*, 2010).

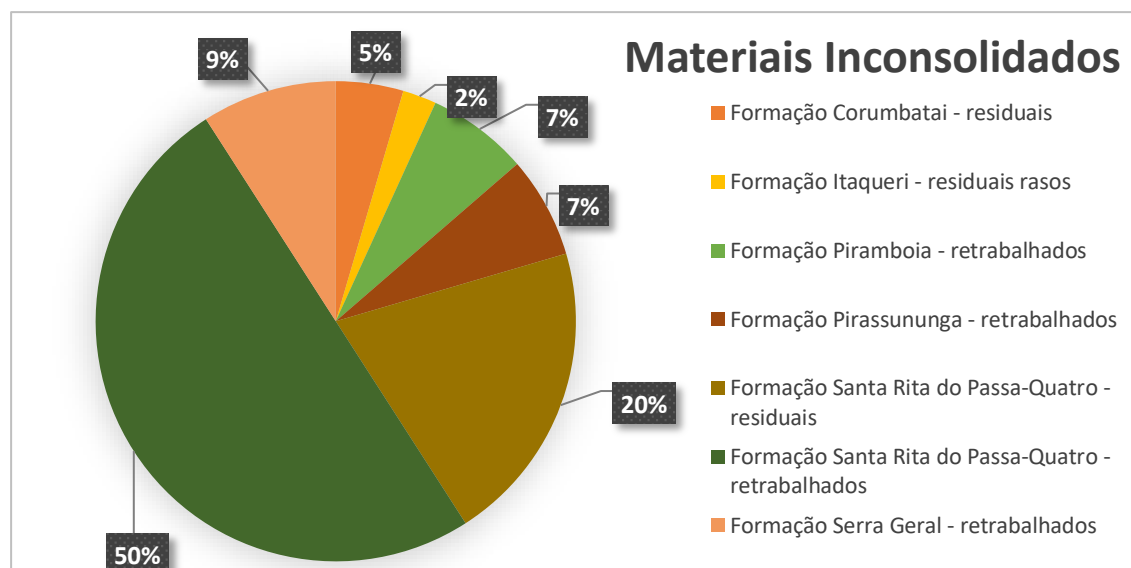
Neste contexto, a mecanização da agricultura pode ser um fator contribuinte para a formação de processos erosivos na área de estudo, já que uso de maquinário em grande escala e de forma inadequada acaba ocasionando na compactação do solo. A compactação do solo tem como principal resultante alterações no regime de escoamento superficial, bem como o direcionamento proveniente das obras de drenagem urbana e, somado a outros fatores como o tipo de solo, declividade do terreno e do uso da terra, podem levar ao aumento das feições já existentes na BHRB, podendo evoluir para a formação de voçoroca.

Feres (2002) realizou um estudo na Bacia do Rio Bonito, sendo possível observar que na malha urbana e nas proximidades apresenta uma diminuição no nível de proteção dos terrenos, ocasionando em um aumento da perda do solo, aumento dos sedimentos e aparecimento de voçorocas.

Nas áreas de cultivo de culturas temporárias, a adoção de técnicas de cultivo em nível e plantio direto, dentre outras, pode ajudar na prevenção à erosão. Bem como a redução das perdas de solo, nas áreas de pastagens, que podem ser mitigados com a adoção do pastejo rotacionado, diminuição do número de cabeças de gado por hectare e adubação dos solos, com o intuito de aumentar a produtividade do pasto, aumentando a cobertura do solo.

Com relação às unidades de materiais inconsolidados, se observa que a unidade Santa Rita do Passa-Quatro contém cerca de 70% dos processos erosivos cadastrados na área, sendo 50% da classe de retrabalhados e 20% referente aos residuais (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Porcentagem para cada classe de materiais inconsolidados



Fonte: Próprio autor.

Ao se avaliar a relação com os materiais inconsolidados para Santa Rita do Passa-Quatro – retrabalhados, a maioria das erosões ocorrem em áreas de perfis com espessura de 5 a 8m, sendo caracterizada por áreas de topo planos, com declividade <5%, permeabilidade média, com textura arenosa, e possui um alta erodibilidade (FERES, 2002).

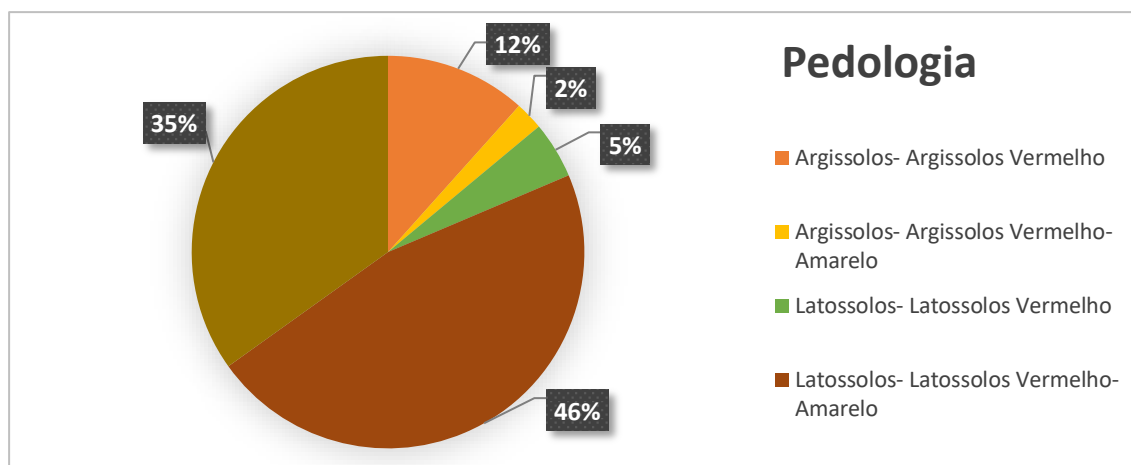
Já para a classe de Santa Rita do Passa-Quatro – residuais, os processos erosivos cadastrados ocorrem em vales e encostas com declividade >5%, apresentando permeabilidade média, com textura arenosa, com espessura de $\cong$ 8m, sendo uma área com alta erodibilidade.

A ocorrência da erosão normalmente é superior nos solos com textura arenosa. Embora as partículas de areia sejam maiores que as partículas de argila, normalmente os solos arenosos são menos estruturados que os solos argilosos. De tal modo, os solos que possuem textura arenosa ou média apresentam maior susceptibilidade a ocorrência de processos erosivos do que os solos de textura argilosa ou muito argilosa.

Como mencionado anteriormente, a região tem sua economia com base na atividade agrícola, desta forma a atividade sobre o substrato arenoso pouco consolidado, pode contribuir para esses campos se tornarem mais susceptíveis a ocorrência de erosão.

Na área de estudo há predominância da ocorrência de processos erosivos em Latossolos Vermelho-Amarelo, os quais correspondem a ocorrência em 46% da área total, seguido pelo Neossolo Quartzarênicos representando 35% dos cadastros de processos erosivos na área de estudo (Gráfico 3).

Gráfico 3– Ocorrência de processos erosivos considerando a pedologia da BHRB.



Fonte: Próprio autor.

Os Latossolos, argilosos ou muito argilosos, apresentam uma boa permeabilidade por serem solos bem estruturados e porosos, em geral, são solos resistentes aos processos erosivos, decorrente das boas condições físicas. No entanto, suas características acabam favorecendo ao uso intensivo da mecanização agrícola de áreas com Latossolos, ocasionando na compactação dos solos, e até mesmo o seu uso para a ocupação urbana ou industrial, propiciando condições favoráveis ao desencadeamento de processos erosivos nessas áreas.

Ainda, os Latossolos sofrem influência da alta temperatura e umidade, características de ambientes tropicais, como é o caso da área de estudo, onde ocorrem chuvas torrenciais e a maior temperatura dos solos, o que aumenta a susceptibilidade a erosão do solo.

Os Neossolos Quartzarênicos são solos constituídos por grãos de areia simples e não apresentam coesão, com baixa capacidade de retenção de água e baixos teores de matéria orgânica e argila, sendo facilmente movimentados pelos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, resultando em uma alta susceptibilidade. (ARAÚJO *et al.*, 2013).

Em um estudo desenvolvido em uma bacia hidrográfica com o intuito de analisar qual a susceptibilidade à erosão considerando diferentes tipos de solos, foi possível constatar que as unidades de mapeamento compostas por Latossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo, bem como outros tipos de solos, foram enquadradas como áreas da bacia de alta susceptibilidades à erosão (SARAIVA; SILVA; SANTOS, 2016). Logo, a BHRB está inserida em sua maior parte em solos que apresentam características favoráveis ao surgimento de processos erosivos.

Apesar da maior parte da BHRB apresentar uma declividade relativamente pequena, bem como o limiar crítico para o desencadeamento do processo erosivo, tais atributos devem

ser levandos em consideração, já que contribuem com a evolução do processo erosivo nesses locais com pequena declividade, devido suas características apresentarem condições propicias ao desencadeamento de processos erosivos.

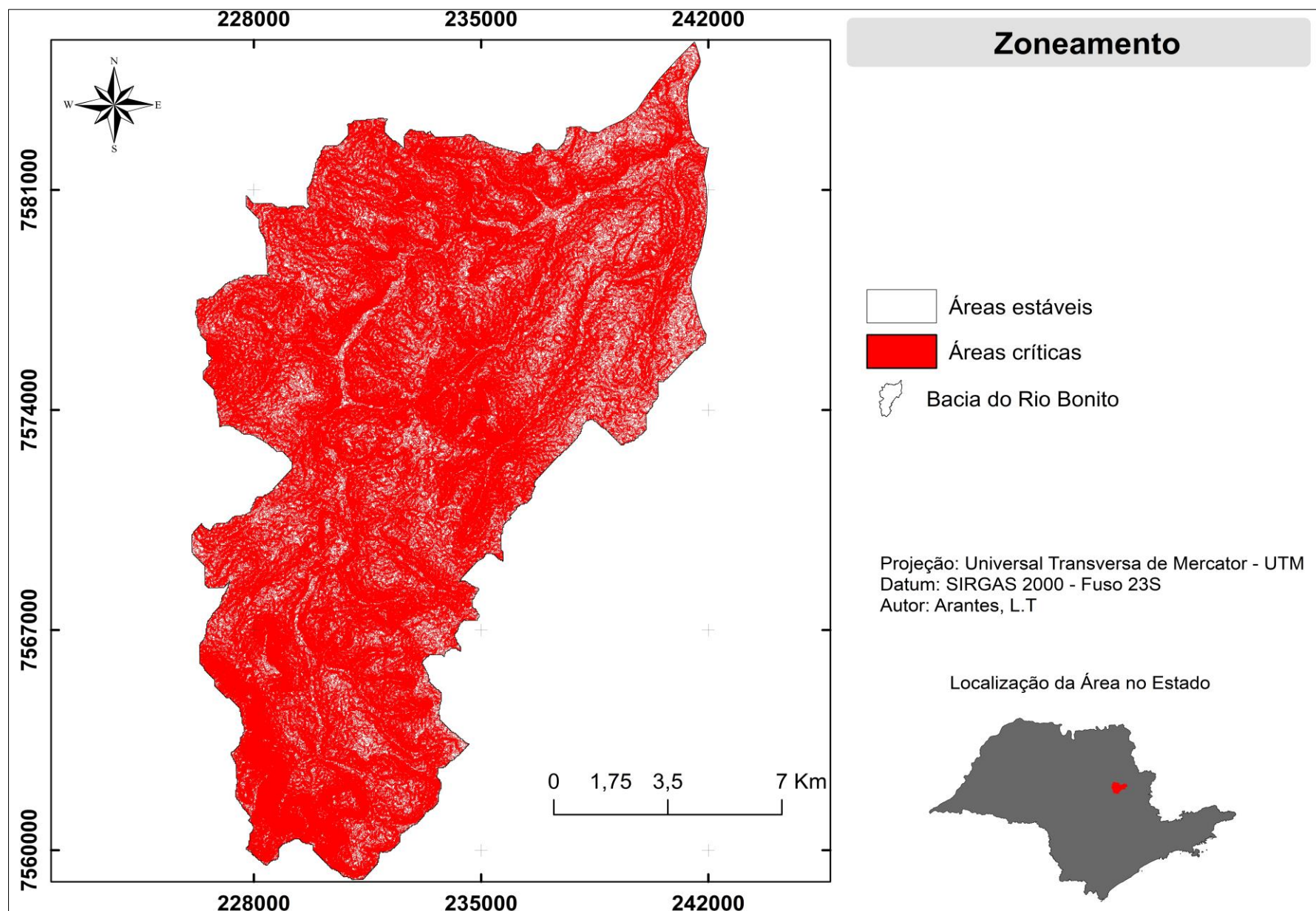
5.7 ZONEAMENTO DE ÁREAS DE OCORRÊNCIA DE EROSÕES COM BASE NOS LIMIARES TOPOGRÁFICOS

A carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões consiste na representação cartográfica das áreas críticas ao desencadeamento de processos erosivos com base no limiar topográfico obtido, a partir da relação da área de contribuição e declividade na BHRB.

Assim, realizou-se a integração dos planos de informação: carta de declividade, mapa de direção de fluxo acumulado e os parâmetros “a” e “b”, com o intuito de verificar as áreas críticas a formação de canais de erosão, denominada a partir da equação apresentada no item 4.4, conforme proposto por Neves (2017).

A partir da carta de zoneamento de áreas de ocorrência de erosões elaboradas pelo índice obtido $S = 0.0333A^{-0.039}$, é possível observar que as áreas críticas estão em conformidades com a maioria dos pontos mapeados, sendo a maior parte da BHRB sendo classificada como critica a ocorrência de processos erosivos (Figura 17).

Figura 17- Carta de zoneamento de áreas críticas de processos erosivos



Considerando o valor de declividade crítica obtido na etapa 5.5 para o desencadeamento de processos erosivos ser de 3,33% por hectare, isto é, uma declividade relativamente baixa para a ocorrência de processos erosivos, grande parte da BHRB foi classificada como sendo área crítica onde ocorrerá a formação de canais de erosão. Isso se deve ao fato maior parte da BHRB apresentar declividade baixas, sendo apenas pequenas porções da bacia em locais com declividades maiores, assim a maior parte encontra-se acima do limiar crítico.

Além disso, como apresentado anteriormente para o estudo da ocorrência de processos erosivos em países tropicais deve ser levado em consideração alguns atributos ambientais, como o uso e ocupação do solo, materiais inconsolidados, tipos de solo, isto é, as características da região de estudo, sendo a morfometria (SxA), a relação de apenas dois destes fatores condicionantes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho propôs o uso de imagens de radar (ALOS-Palsar) para verificar a viabilidade na obtenção dos parâmetros de área de contribuição (A) e declividade (S), de forma automática, e posteriormente, a representação do limiar topográfico para o desencadeamento de canais de erosão e, por fim, representar espacialmente o limiar crítico obtido, por meio da carta de zoneamento de áreas prováveis de ocorrência de erosão.

Foi possível observar que os atributos ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Bonito, apresentam características propícias ao desencadeamento de processos erosivos. Sendo as diferentes formas de cobertura e uso do solo, constituídas por áreas de maior pressão antrópica e suas atividades derivadas influenciando diretamente no equilíbrio morfodinâmico da bacia hidrográfica. Como apresentado, a maior parte dos processos erosivos, cerca de 49%, ocorrem justamente nas áreas com atividades agrícolas, assim, essa prática acaba expondo periodicamente o solo, necessitando práticas de manejo intensivo e constante de manutenção dos mecanismos implantados de conservação do solo, de forma que proteja o solo da evolução do processo erosivo, bem como o seu desencadeamento.

Um dos fatores contribuintes na ocorrência de processos erosivos na BHRB, se deve ao fato da mesma apresentar cerca de 46% dos processos erosivos inseridos em Latossolos Vermelho-Amarelo, contribuindo ainda mais para a ocorrência de processos erosivos, justamente por ser um solo que apresenta boas condições para práticas agrícolas, intensificando assim o seu uso,

A partir do valor obtido da relação entre a área de contribuição (A) e declividade média (S), foi possível estabelecer a declividade crítica que levaria o desencadeamento do processo erosivo na Bacia Hidrográfica do Rio Bonito, sendo esta declividade de 3,33% (0,033m/m).

Ainda, quando comparado os dados obtidos nesse estudo, isto é, o valor da declividade crítica obtida que levaria o desencadeamento de processos erosivos, para uma área de contribuição de 1ha, com dados de estudos desenvolvidos em outras regiões no Brasil, como por exemplo, por Araújo (2011), Stabile (2013) e Neves (2017). Constata-se através dos dados situação análoga a essas regiões, isto é, as declividades críticas para o desencadeamento dos processos erosivos nessas regiões também apresentaram valores de declividade relativamente baixa, isso se deve ao fato dessas regiões possuírem características físicas semelhantes a BHRB.

Logo, a declividade que proporciona o desencadeamento da erosão está inserida em áreas que apresentam terrenos com declividades suaves, com escoamento superficial médio. Tal fato, deve-se a maior parte da bacia apresentar declividades relativamente baixas, além disso, as declividades médias obtidas para os canais estão entre 2 e 10%, podendo constar que os locais com a presença de feições erosivas estão localizados em terrenos com declividades suaves, justificando assim a baixa declividade obtida pelo índice para a formação de canais de erosão. Além de evidenciar que existem condições naturais que condicionam a ocorrência da erosão, como geologia, cobertura e uso do solo, vegetação e pedologia.

De tal modo, como a metodologia empregue abrange somente parâmetros relacionados a característica do relevo A e S , é de suma importância que o desencadeamento ocorra em consonância com esses parâmetros. Portanto, muitas vezes essas características não são encontradas em todas as feições, assim o desencadeamento de processos erosivos não depende de forma individual da relação $A \times S$, sendo necessário uma análise conjunta com as características físicas do meio, de forma que permita um melhor entendimento acerca do desencadeamento desses processos erosivos. Como apresentando ao longo do trabalho, apesar da declividade ser um fator de grande influência no surgimento de canais de erosão, outros fatores que condicionam maior ou menor resistência a erosão devem ser empregues na análise, permitindo uma modelagem mais fidedigna a realidade da região.

Ao implementar a equação $S = aA^{-b}$ no *software* ArcMap, foi possível representar de forma espacial o limiar crítico de desencadeamento de canais de erosão, e em seguida, elaborar a carta de zoneamento de áreas críticas de processos erosivos, no qual indicam quais áreas são estáveis e não estáveis. Deste modo, a partir do desenvolvimento desse estudo foi possível concluir que a Bacia do Rio Bonito apresenta um percentual alto de áreas críticas para a ocorrência de processos erosivos, em função das características do meio físico.

Em relação ao uso de dados provenientes de radar, neste caso, o modelo digital de elevação, o mesmo constitui-se em um dado de suma importância para a análise dos limiares topográficos, partindo do pressuposto de que o mesmo se trata de um dado base para a obtenção dos parâmetros topográficos.

Neste contexto, o uso da metodologia adotada surge como uma possível solução decorrente da problemática enfrentada para a aquisição desses dados altimétricos, em escala detalhe, para a obtenção dos parâmetros topográficos $S \times A$, além de permitir por meio do uso do SIG uma melhor compreensão dos diferentes fatores atuantes na BHRB, proporcionando uma visão mais ampla e precisa da área de estudo, de forma mais rápida e simples.

Conclui-se também, a partir desse estudo, que não possui uma única declividade crítica para o desencadeamento de processos erosivos que podem ser empregues para várias regiões, visto que o índice obtido para essa área de estudo apresenta valor distinto quando comparado com os valores obtidos em estudos desenvolvidos em outras áreas. Assim, para a utilização do índice deve-se considerar as peculiaridades físicas de cada região, isto é, clima, pedologia, geologia, uso e ocupação do solo, vegetação, dentro outros fatores que exerce algum tipo de influência no surgimento de processos erosivos.

7 RECOMENDAÇÕES

Para o desenvolvimento de trabalhos da mesma natureza, recomenda-se:

- Uso de modelo digital de elevação com maior resolução para a obtenção dos parâmetros de declividade média e área de contribuição, já que estes sofrem influência decorrente da resolução;
- Realização de etapas de campo, para o levantamento de dados *in loco*, como a obtenção das coordenadas na cabeceira da erosão, para auxiliar no processo de classificação das feições erosivas, para melhor ajuste dos parâmetros *A versus S*;

REFERÊNCIAS

- ABDO, M. T. V. N *et al.* Gully Erosion stabilization in a highly erodible kandiuistalf soil at pindorama, São Paulo State, Brazil. **Ecological Restoration**, Madison, v. 31, n. 3, p. 246-249, 2013.
- ALASKA SATELLITE FACILITY. **ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011**. Fairbanks, 2018. Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>. Acesso em: 03 out. 2018.
- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 247-271, 2005.
- ALBURQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vicosa, MG, v. 24, p. 141-151, 2000.
- ALEWELL, C *et al.* Suitability of $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{137}Cs as tracers for soil erosion assessment in mountain grasslands. **Chemosphere**, Kidlington, v. 103, p. 274-280, 2014.
- ALMOROX, A. J. *et al.* **Métodos de estimación de la erosión hídrica**. Madrid: Agrícola Española, 1994.
- ALMOROX, A. J.; BERMUDÉX, F. L.; RAFAELLI, S. La degradacion de los suelos por erosion hídrica: métodos de estimacion. Murcia: Universidade de Murcia, 2010. 384p.
- ARAÚJO, G. H.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. Rio de Janeiro, Brasil: Bertrand Brasil LTDA, 2005.
- ARAÚJO, C. M. J.; SANTOS, A. B.; OLIVEIRA, J. P.; GOMES, M. V.; ALVES, R. R. Neossolo quartzarênico: área natural e meio antropizado no assentamento rural de Angical/BA. In: ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 14., 2013, Lima. **Anais [...]** Lima: [s. n.], 2013.
- ARAUJO, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP**. 2011. 181 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- BAGATINI, T. Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança no tipo de uso da terra, em dois métodos de preparo do solo e dois tipos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 999-1011, 2011.
- BARBOSA, M. E. F.; FURRIER, M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Gurujá, litoral sul do estado da Paraíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2009, Viçosa, MG. **Anais [...]** Viçosa, MG: UFV, 2009.
- BEGIN, B. Z.; SCHUMM, S. A. Gradational thresholds and landform singularity: Significance for Quaternary studies. **Quaternary Research**, New York, v. 21, n. 3, p. 267-274, 1984.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**: 3. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. *In*: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: UFGS, 1993.p. 915-43.
- BOSQUILIA, R *et al.* Comparação entre métodos de mapeamento automático de rede de drenagem utilizando SIG. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 3, p. 445-457, 2015.
- BOTELHO, R. G. M. *In*: GUERRA, A.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R. G. M (org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 269-293.
- BOUAZIZ, M.; WIJAYA, A.; GLOAGUEN, R. Gully erosion mapping using ASTER data and drainage network analysis in the main ETHIOPIAN rift. *In*: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2009, Cape Town. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2009.
- BRASIL. **Lei Nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 03 ago. 2018.
- CAMARGO, A. A. B. **Avaliação e quantificação da contribuição de uma voçoroca para o assoreamento do ribeirão da Cruzes, tributário da represa de Três Irmãos, SP**. 2012. 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- CANÇADO, C. J.; LORANDI, R.; COSTA, C.W. Carta de potencial de contaminação de aquíferos por atividades antrópicas como subsídio ao zoneamento (geo)ambiental – estudo de caso na bacia hidrográfica do rio bonito. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2014, Belo Horizonte. **Anais** [...] Belo Horizonte: Fenágua, 2014.
- CANÇADO, C. J. **Zoneamento conceitual da expansão das atividades antrópicas relacionado à inundação**: estudo de caso: bacia do Rio Bonito (SP). 2003. 469 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- CANTALICE, J. R. B *et al.* Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco argilo arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 597-607, 2005.
- CASCALE, G.S.; ELVIRA, S. P. L.; LOZANO, S. J. M. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. **Revista Renewable and Sustainable Energy**, Alexandria, n. 24, p. 544-556, 2013.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entres sulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 117-124, 2003.

CARVALHO, J. C. *et al.* Processos erosivos. In: CARVALHO, J. C. *et al.* **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília, DF: Finatec, 2006. p. 39-91.

CARVALHO, D. F. *et al.* Perda de solo e água em argissolo vermelho amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2002.

CARVALHO, J. C.; LIMA, C.; MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais [...]** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia e de Engenharia Ambiental, 2009.

CHAGAS, C. S. *et al.*; Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 218-226, 2010.

CHAVES, H. M. L. *et al.* Evolução da Erosão do Solo no Distrito Federal no Período de 1953 a 1991. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1996, Salvador. **Anais..**Salvador: INPE, 1996.

CLIBSON, A. SANTOS. SOBREIRA, F. G.; COELHO NETO. A. L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 55, n. 4, p. 285-290, 2002.

CORRECHEL, V. **Avaliação de Índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do ¹³⁷C**. 2003. 79 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CRUZ, R. C.; TAVARES, I. S. Bacia hidrográfica: aspectos conceituais e práticos. In: RIGUES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 159-168.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. Degradação Ambiental. In: **Geomorfologia e meio ambiente**. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p. 337-379.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2006.

ENVIROMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGis Desktop**. Versão 9.3. Redlands: ESRI Inc., 2008.

FAVARETTO, N.; DIECKOW, J. Conservação dos recursos naturais solo e água. In: LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **O solo no meio ambiente**. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, 2007. p. 111-126.

FAO- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS (ITPS). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Roma, 2015. 648 p.

FENDRICH, R. *et al.* Drenagem e controle da erosão urbana. In: FENDRICH, R. **Erosão urbana**. 4. ed. [S. l.: s. n.], 1997. p. 15-49.

FENG, J *et al.* Land degradation in the source region of the Yellow River, northeast QinghaiXizang Plateau: classification and evaluation. **Environmental Geology**, Heidelberg, p.459-466, 2005.

FERNANDES, M. R.; SILVA, J. C. **Programa estadual de manejo de sub-bacias hidrográficas**: fundamentos e estratégias. Belo Horizonte: EMATER-MG, 1994.

FERNANDES, N. F. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, DF, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERES, R. **Análise de processos de erosão acelerada, com base em fotografias aéreas e geoprocessamento: Bacia do Rio Bonito (Descalvado, SP)**. 2002. 158 f. Teses (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

FERREIRA, S. M.; LOUREIRO, H. A. S. O papel das geotecnologias no estudo de feições erosivas e de movimentos de massa no Brasil. In: GUERRA, A. J.; SILVA, A. S.; JORGE, M. C. O. (org.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. p. 95-125.

FICHER, K. N. *et al.* Avaliação de modelos digitais de elevação para obtenção de características morfométricas na região de transição de relevo. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 14, n. 1, p. e2280, 2019.

FREITAS, A. R. **A repercussão da legislação na dinâmica do uso da terra na bacia do rio Cará-Cará, Ponta Grossa – PR, no período de 1980 a 2007**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.

GALETI, P. A. **Conservação do solo**: reflorestamento: clima. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1979.

GOMES, D. M. **Mapeamento geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, São Pedro/SP na escala 1:20.000**. 2002. 242 f. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos, 2000.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (org.). **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p. 13-42.

HORTON, R. R. Erosional development of streams and their drainage basins hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 56, p. 275-370, 1945.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING AT SYDNEY, 30., 1988, Australia. **Proceedings** [...] Australia: [s. n.], 1988.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 106, p. 211-232, 1989.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.131-152.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Descalvado, SP**. IBGE Cidades. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

JACINTHO, E. C. *et al.* Solos tropicais e os processos erosivos. In: CARVALHO, J. C *et al.* **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília, DF: Finatec, 2006. p. 93-156.

JACQUES, P. D. **Geoprocessamento na identificação de áreas susceptíveis à erosão laminar na bacia do rio Ubatiba, Maricá – RJ**. 1997. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1997.

KONZ, N.; PRASUHN B, V.; ALEWELL, A. On the measurement of alpine soil erosion. **Journal Catena**, v.91, p.63-71, 2012.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.35, p. 2167-2174, 2011.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Estudos da geografia física em bacias hidrográficas sob a ótica da paisagem integrada. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA APLICADA, 2009, Viçosa. **Anais** [...] Viçosa, MG: UFU, 2009.

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

LIN, W *et al.* Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. **Hydrological Processes**, Oxford, v. 20, p. 289–306, 2006.

LOHMANN, M. **Estudo morfopedológico da Bacia do Arroio Guassupi, São Pedro do Sul- RS: Subsídio à compreensão dos processos erosivos**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: definições, tipos e formas de controles. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, 7., Goiânia. **Anais** [...] Goiânia: Associação Brasileira de Geologia e de Engenharia Ambiental, 2009.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A Where do channels begin. **Nature**, London, v. 336, n. 2-4, p. 232-234, 1988.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Landscape dissection and drainage área-slope thresholds. In: KIRKBY, M. J. **Process models and theoretical geomorphology**. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1994. p. 221–246.

MARION, F. A., SANTOS, E. B., HENDGES, E. R., Análise de modelos digitais de elevação para modelagem do relevo no município de Francisco Beltrão – PR. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 9, n. 2, p. 50-60, 2015.

MENÉNDEZ-DUARTE, R.; MARQUÍNEZ, J.; FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, S.; SANTOS, R. Incised channels and gully erosion in northern iberian peninsula: controls and geomorphic setting. **Catena**, Amsterdam, v. 71, p. 267 - 278, 2007.

MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. **Landscape dissection and drainage area-slope thresholds**. In: KIRKBY, M. J. (ed). *Process models and theoretical geomorphology*. Chichester: Wiley, 1994. p. 221-246.

MORAES, M. E. B. **Zoneamento ambiental de bacia hidrográficas: Uma abordagem metodológica aplicada na bacia do Rio Bonito (SP)**. 2003. 145 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

MORENO. M. P.A *et al*. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. **Investigaciones geográficas**, Santiago, n. 51, p. 23-36, 2003.

MOTA, S. **Planejamento urbano e preservação ambiental**. Fortaleza: UFC, 1991.

MULLAN, D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. **Catena**, Amsterdam, v. 109, 2013, p. 234-246.

NACHTERGAELE, J. POESEN, J. GOVERS. G. Ephemeral gullies. A spatial and temporal analysis of their characteristics, importance and prediction. **Belgeo**, Heverlee, v. 2, p. 159-182, 2002.

NASCIMENTO, W. M.; VILLAÇA, M. G. Bacias hidrográficas: planejamento e gerenciamento. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Três Lagoas, v. 1, n. 7, p. 102-120, 2008.

NASCIMENTO, F. J. B *et al*. Caracterização espaço-temporal das chuvas associada às vazões na bacia do rio Macaé - RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 4., 2010, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: UFC, 2010.

NEARING, M. A.; LANE, L. J.; LOPES, V. L. Modeling soil erosion. In: LAL, R. **Soil erosion research methods**. 2. ed. Florida: Sta Lucie, 1994. p. 127-156.

NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM Production Methods and Sources. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 31-64. (Developments in Soil Science, 33),

NEVES, M. P. **Análise dos processos erosivos na bacia do córrego do meio - município de São Pedro (SP): estudo do desencadeamento das erosões.** 2017. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

NEVES, M. P.; PEJON, O. J. Análise do efeito da resolução espacial do modelo digital de elevação na obtenção do limiar topográfico para predição de processos erosivos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2017, Santos. **Anais [...]** Santos: SBRS, 2017.

NUNES, M. C. M. **Erosão hídrica em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul.** 2006. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

OLIVEIRA, J. B. **Carta pedológica semi-detalhada do estado de São Paulo:** quadrícula de Descalvado. Campinas: IAC, 1982.

OLIVEIRA, H. H. **Proposta de criação e caracterização da área de proteção ambiental de Descalvado, SP.** 1995. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, M. A. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos:** conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-99.

OLIVEIRA, P. T. S. *et al.* Geoprocessamento como ferramenta no licenciamento ambiental de postos de combustíveis. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, MG, v. 20, n. 1, jun. 2008.

OLIVEIRA, Paulo T. S. de *et al.* Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 819-82, 2010.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S.; ARAUJO, R. C. Processos Erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 5, n. 3, jun. 2018.

PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. Gully erosion, northwestern Colorado: a threshold phenomenon. **Geology**, Cambridgeshire, v. 3, n. 2, p. 88-90, 1975.

PANAGOPOULOS, T.; ANTUNES, M. D. C. Integrating geostatistics and gis for assessment of erosion risk on low density quercus suber woodlands of south Portugal. **Arid Land Research and Management**, New York, v. 22, n. 2, p. 159-177, 2008.

PRANDINI, F. L.; IWASA, O. Y. **Diagnostico da origem e evolução de boçorocas.** São Paulo: IPT, 1980.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, J. M. A. **Conservação de Solo e Água:** práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2. ed. Viçosa, MG: Editora da UFV, 2009.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 12, n. 1, p. 101-117, 2016.

ROCHA, C. H. B. *et al.* Comparação de modelos digitais de elevação obtidos de diferentes bases de dados - curvas de nível e pontos cotados IBGE, LIDAR, SRTM e ALOS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E XXVI EXPOSICARTA, 2017, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 2017. p. 1302-1306.

ROMÃO, A. C. B. C.; SOUZA, M. L. **Análise do uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão São Tomé, noroeste do Paraná – PR (1985 e 2008)**. 21. ed. Curitiba: Raígia, 2011.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005.

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

RUBIRA, F.; MELO, G.; OLIVEIRA, F. K. S. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, p. 168-193, 2016.

SÁ, C. A. **Mapeamento de Declividades voltado para o controle de processos erosivos em sítios florestais**. 2001. 36 f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SALA, M.G.; GASPARETTO, N.V.L. Fragilidade ambiental dos solos em bacias hidrográficas de pequena ordem: O caso da bacia do Ribeirão Maringá-PR. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 28, n. 2, p. 113-126, 2010.

SANCHES, F. G. **Fatores condicionantes dos processos erosivos na sub-bacia hidrográfica de Água de Gato, Cabo Verde**. 24. ed. Coimbra: Territorium, 2017.

SANTOS, S. A. M.; RUFINO, P. H. P. Proposta do programa de educação ambiental. In: SCHIEL, D. *et al.* **O Estudo de Bacias Hidrográficas**: uma estratégia para educação ambiental. 2. ed. São Carlos: Rima, 2003. p. 9-13.

SÃO PAULO, Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CPRN. Instituto Geológico. **Formações geológicas de superfície**: Folha Geológica de Descalvado (Folha SF-23-V-C-IV-4). Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1984a.

SÃO PAULO, Secretaria de Agricultura e Abastecimento. CPRN. Instituto Geológico. **Formações geológicas de superfície**: Folha Geológica de Corumbataí (Folha SF-23-Y-A-12). Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1984b.

STABILE, R. A. **Limites topográficos de feições erosivas lineares em Piratinga (SP)**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F. G.; COELHO NETO, A. L. Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto – MG. **Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 4, p. 285-290, 2002.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford University Press, 1993.

SILVA, A. F. **Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tucum, São Pedro- SP, escala 1:10.000**. 2003. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

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

SILVA, J. S. V. **Análise multivariada em zoneamento para planejamento ambiental. Estudo de caso: Bacia Hidrográfica do Rio Taquari MS/MT**. 2003. 307 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, R. M. da. **Introdução ao geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações**. Novo Hamburgo: Feevale, 2007.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. [S. l.: s. n.], 2001

SISTEMA DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SIFESP. **Mapa do Município de Descalvado – SP**. São Paulo, 2018. Disponível em <http://s.ambiente.sp.gov.br/sifesp/descalvado.pdf> . Acesso em: 01 jul. 2018.

SOUZA, C. M.; PIRES, F. R. **Práticas mecânicas de conservação do solo e da água**. 3. ed. Viçosa, MG, 2006.

SOUZA, N. C. *et al.* Análise da associação entre características topográficas e tipos de ocorrência de processos erosivos ao longo de linha férrea - estudo de caso: malha Paulista - all (SP). **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 20, n. 4, p. 947-969, 2014.

SPÖRL, C. **Modelo de fragilidade ambiental utilizando redes neurais artificiais**. 2007. 183 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SORENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 34, p. 79-89, 2007.

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

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

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 1997.

VERDOOT, A. **Soil degradation**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: http://users.ugent.be/~averdood/Cursus%20Land%20Degradation_v20112012_reducedpdf. Acesso em: 05 de set. 2018.

TORRI, D.; POESEN, J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 130, p. 73-85, 2014.

TOREZAN, F. E. **Análise Ambiental da Bacia do Rio Bonito (Descalvado - SP) com ênfase nas atividades de exploração mineral de areia**. 2000. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

USU. **TauDEM Version 5**. Utah State University, Hydriology Research Group, 2018. Disponível em: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html>. Acesso em: 13 jun. 2018.

VALERIANO, M. M. Dados Topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 3, p.72-103.

VANDAELE *et al.* Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 161- 173, 1996.

VANDEKERCKHOVE, L. *et al.* Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean. **Elsevier Science**, Amsterdam, v. 33, p. 271- 292, 1998.

VANDEKERCKHOVE, L. *et al.* Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. **Earth Surface Processes and Landforms**, Oxford, v. 25, p. 1201-1220, 2000.

VIEIRA, A.C. **Controles morfológicos para a iniciação de canais em encostas naturais por fluxos superficiais: evidências de campo e modelagem**. 2002. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

VIEIRA, P.H.; BRAZ, A.M.; MIRANDOLA, P. H. A importância do Spring como uma ferramenta de análise ambiental: Caso da bacia hidrográfica do Uerê/MS. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 49-59, 2012.

VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. Erosão dos solos. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, J. H (org.). **Solos do interior de São Paulo**. São Paulo: ABMS, 1993, v. 1, p.177-206.

WALLING, D. E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 344, p. 159-184, 2005.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e Assoreamento. In: SANTOS, R. F (org.). **Vulnerabilidade ambiental**. Brasília, DF: MMA, 2007. p. 41-60.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain**. Washington: ARS/USDA, 1965.

ZANATTA, F. A.; LUPINACCI, C.; BOIN, M.; MORUZZI, R. Antropogeomorfologia e Problemática Erosiva em Área Rural Degradada, Marabá Paulista (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. spe, p. 199-207, 2017.

ZUQUETTE, L. V.; CARVALHO, J. A. R.; YAMANOUTH, G. R. D. B. Feições erosivas na bacia do córrego do Espraiado, São Pedro (SP), seus tipos e evolução entre 1972 - 2002. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 37, p. 414-425, 2007.