

IRVING RODRIGUES DE SOUZA

Investigação de áreas suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra no município de Cunha – SP, associadas a projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 para o período de 2023 a 2040

Irving Rodrigues de Souza

Investigação de áreas suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra no município de Cunha – SP, associadas a projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 para o período de 2023 a 2040

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Tadeu da Silva
Coorientador (a): Prof. Dr. Paulo Valladares Soares

S729i	<p>Souza, Irving Rodrigues de Investigação de áreas suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra no município de Cunha - SP, associadas a projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 para o período de 2023 a 2040 / Irving Rodrigues de Souza – Guaratinguetá, 2022. 115 f : il. Bibliografia: f. 106-115</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Luiz Tadeu da Silva Coorientador: Prof. Dr. Paulo Valladares Soares</p> <p>1. Deslizamentos (Geologia). 2. Fatores climáticos. 3. Planejamento urbano - Fatores climáticos. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 624.131.53</p>
-------	---

IRVING RODRIGUES DE SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM “ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



Prof^ª. Dr^ª. Isabel Cristina de Barros Trannin
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Luiz Tadeu da Silva
Orientador/INPE



Prof. Dr. Paulo Valladares Soares
Coorientador/UNESP-FEG



Me. Thiago Bazzan
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

IRVING RODRIGUES DE SOUZA

NASCIMENTO	04.08.1995 – Lorena / SP
FILIAÇÃO	Isnaldi Rodrigues de Souza Denise Auxiliadora de Andrade
2017/2022	Graduação em Engenharia Civil UNESP – Campus de Guaratinguetá

dedico este estudo
de modo especial, à minha família,
a base da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Criador, pelas graças concedidas que me permitiram chegar em um momento tão importante da minha vida.

Aos meus pais Isnaldi e Denise, que apesar das dificuldades enfrentadas, nunca mediram esforços em proporcionar as melhores condições e incentivo aos estudos, possibilitando alcançar meus sonhos.

Ao meu irmão Isnaldi Filho, pela grande amizade de sempre, pelos conselhos, e por sempre me apoiar.

À Débora, por ser companhia constante, e por sempre oferecer suporte, paciência e compreensão.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luiz Tadeu da Silva e Prof. Dr. Paulo Valladares Soares pela amizade e parceria construídas, ensinamentos ao longo destes anos, e confiança no meu potencial, influenciando diretamente no meu crescimento profissional e principalmente pessoal.

Ao Prof. Msc. Thiago Bazzan, pela amizade e por me inserir aos estudos em sensoriamento remoto e primeiros trabalhos acadêmicos, e por sua enorme prestatividade e solidariedade para comigo e ao Departamento de Engenharia Civil do Campus de Guaratinguetá.

Ao pesquisador Prof. Dr. Marcelo Barbio Rosa, que me auxiliou na obtenção de dados de precipitação e me orientou em conversas construtivas para melhor condução e execução do estudo.

Ao Prof. Efraim Gregório Ferraz, pela contribuição do seu conhecimento pessoal acerca do município de Cunha para o enriquecimento do estudo.

Aos amigos que fiz nos anos de graduação e que estiveram comigo lado a lado tornando única minha experiência na Universidade.

A todos os docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, pelos ensinamentos e atendimento ao longo de toda minha formação.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela estrutura e equipamentos fornecidos, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa, permitindo o desenvolvimento do presente estudo.

A todos que em algum momento participaram e contribuíram de alguma forma para a conclusão desta etapa da minha vida.

*“Sobrecarregados para
sempre pelo desejo e pela ambição*

Há uma fome ainda não saciada

*Nossos olhos cansados ainda se
perdem pelo horizonte*

*Embora já tenhamos passado por
esta estrada tantas vezes.”*

High Hopes – Pink Floyd

RESUMO

O município de Cunha, situado no Estado de São Paulo, tem sofrido alterações no seu uso e ocupação do solo. No período de janeiro de 2010 eventos extremos de precipitação resultaram em deslizamentos de terra que causaram a morte de 6 pessoas. Desta maneira, o presente estudo objetiva identificar e analisar áreas suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra no município de Cunha, e, com o uso de projeções climáticas do modelo regional Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, prever novos extremos climáticos e possíveis novas áreas vulneráveis no município, entre os períodos de 2023 a 2040. Através do banco de imagens de satélites do *Google Earth*, foram obtidos 800 pontos de cicatrizes ocorridos no dia 01/01/2010. Com auxílio do *software* ArcGIS® 10.8 os mapas temáticos para as variáveis pedologia, litologia, uso e cobertura do solo, declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical e distância da malha viária foram elaborados. A partir das cicatrizes cadastradas do município foram calculados os pesos para cada classe das variáveis, que variaram entre 0,00 e 1,00 e aplicou-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para obtenção dos pesos de cada variável. Por intermédio da álgebra de mapas, aplicou-se uma modelagem matemática para obter a suscetibilidade. Do resultado, 592 cicatrizes resultaram em suscetibilidade considerada alta, 206 em média e 2 em baixa, sendo o Índice Médio Geral de Suscetibilidade obtido para as 800 cicatrizes no valor de 0,62. Levantados os índices de precipitação diária (PD), acumulada de 5 dias (PA5), máxima acumulada de 5 dias (MAXPA5) e coeficiente de precipitação crítica (CPC), calculou-se a vulnerabilidade a deslizamentos de terra, onde os valores deflagradores de deslizamentos de terra em Cunha para o dia do evento foram de PD igual a 15,70 mm; PA5 de 79,30 mm; CPC de 15,00 mm e MAXPA5 de 135,82 mm. Para as classes consideradas mais críticas, foram registradas 213 cicatrizes na condição de vulnerabilidade muito alta, 330 em alta e 188 em média. Para o bairro da Barra do Bié, local que houve as mortes, registrou-se 10 deslizamentos, com valor de suscetibilidade de 0,69 e vulnerabilidade de 0,83, com 20% do bairro em estado de muito alta vulnerabilidade e 66,50% em alta. Por fim, segundo as projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, identificou-se que 70 outras novas datas com deslizamentos de terra podem ocorrer entre o período de 2023 a 2040. Entende-se, portanto, que os resultados obtidos são de extrema importância para a comunidade e poder público locais, como ferramenta de auxílio no planejamento urbano e combate às catástrofes oriundas dos desastres naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Suscetibilidade a deslizamentos de terra. Vulnerabilidade a deslizamentos de terra. Projeções climáticas Eta-Hadgem-ES RCP 4.5.

ABSTRACT

The municipality of Cunha, located in the State of São Paulo, has changes in its land use and occupation in 2010. In January 2010 extreme precipitation events resulted in landslides that caused the death of 6 people. In this way, the present study aims to identify and analyze susceptible and vulnerable areas to landslides in the municipality of Cunha, and, with the use of climate projections from the regional model Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, predict new climatic extremes and possible new vulnerable areas in the municipality, between the periods of 2023 to 2040. Through the satellite image bank made available by Google Earth, 800 points of scars occurred on 01/01/2010. Thus, through the ArcGIS® 10.8 software, thematic maps for the variables pedology, lithology, land use and cover, slope, horizontal curvature, vertical curvature and distance from the road were made. The weights for each class of variables were calculated using the scars identified in the municipality, with values ranging between 0,00 and 1,00 and the AHP (Analytic Hierarchy Process) method was applied to obtain the weights of each variable. Through map algebra, a mathematical modeling was applied to obtain the susceptibility. From the result, 592 scars resulted in susceptibility considered high, 206 on average and 2 on low, with the General Average Susceptibility Index (IMGS) obtained for the 800 scars in the value of 0,62. After surveying the indexes of daily precipitation (PD), 5-day accumulated (PA5), 5-day maximum (MAXPA5) and critical precipitation coefficient (CPC), the vulnerability to landslides was calculated, where the triggering values of landslides in Cunha for the day of the event were PD equal to 15,70 mm; PA5 of 79,30 mm; CPC of 15,00 mm and MAXPA5 of 135,82 mm. For the classes considered most critical, 213 scars were classified in the condition of very high vulnerability, 330 in high and 188 in average. For the Barra do Bié district, where the deaths occurred, 10 landslides were identified, with a susceptibility value of 0,69 and vulnerability of 0,83, with 20% of the district in a state of very high vulnerability and 66.50 % of high. Finally, according to climate projections Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, for precipitation events, it was identified that 70 other days with landslides could occur between the period 2023 to 2040. It is understood, therefore, that the results obtained are of extreme importance for the community and local public authorities, in order to assist in urban planning and combating catastrophes arising from natural disasters.

KEYWORDS: Landslide Susceptibility. Landslide Vulnerability. Climatological Projections Eta-Hadgem-ES RCP 4.5.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de deslizamento circular (rotacional)	25
Figura 2 – Esquema de deslizamento planar (translacional)	26
Figura 3 – Esquema de deslizamento em cunha.....	27
Figura 4 – Geomorfologia dos terrenos: combinação das curvaturas horizontal e vertical	31
Figura 5 – Caracterização do município de Cunha/SP	41
Figura 6 – Mapa hipsométrico do município de Cunha/SP.....	42
Figura 7 – Precipitação anual média do município de Cunha/SP entre 1977 e 2006.....	43
Figura 8 – Mapa pedológico do município de Cunha/SP	45
Figura 9 – Mapa litológico do município de Cunha/SP	47
Figura 10 – Mapa de uso e cobertura do solo do município de Cunha/SP em 2011	49
Figura 11 – Mapa de declividade do município de Cunha/SP.....	51
Figura 12 – Mapa de curvatura horizontal do município de Cunha/SP.....	53
Figura 13 – Mapa de curvatura vertical do município de Cunha/SP.....	54
Figura 14 – Mapa de distância da malha viária do município de Cunha/SP	56
Figura 15 – Mapa de precipitação diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	58
Figura 16 – Mapa de precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	59
Figura 17 – Mapa de máxima precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (01/09/2000 – 30/11/2011)	60
Figura 18 – Mapa do coeficiente de precipitação crítica do município de Cunha/SP (01/01/2010)	61
Figura 19 – Inundação de rio na estrada do Monjolo – Cunha, que encobriu estrada vicinal em decorrência dos eventos de 01/01/2010.....	62
Figura 20 – Deslizamento de terra no bairro da Barra do Bié – Cunha, que bloqueou estrada vicinal em decorrência dos eventos de 01/01/2010	63
Figura 21 – Restos de ponte do bairro da Barra do Bié – Cunha, devido enchente oriunda dos eventos de 01/01/2010	64

Figura 22 – Fluxograma metodológico	65
Figura 23 – Representação da classificação SVM.....	67
Figura 24 – Diferenciação entre ravinas e cicatriz de deslizamentos de terra.....	69
Figura 25 – “Cicatriz com vítimas” em Cunha, 01/01/2010	84
Figura 26 – Mapa da suscetibilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha	86
Figura 27 – Índice médio geral de cada variável e IMGS	88
Figura 28 – Suscetibilidade a deslizamentos de terra para o município de Cunha, valores para as 800 cicatrizes (01/01/2010).....	88
Figura 29 – Prévia do mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha	90
Figura 30 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha – 20,00% mais críticos	92
Figura 31 – Vulnerabilidade a deslizamentos de terra para o município de Cunha, valores para as 800 cicatrizes (01/01/2010).....	94
Figura 32 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no bairro da Barra do Bié em Cunha/SP	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos de movimentos de massa em encostas	23
Tabela 2 – Escala de importância na AHP	37
Tabela 3 – Matriz com autovetores.....	38
Tabela 4 – Comparação paritária entre as alternativas para cada critério.....	38
Tabela 5 – Índice de consistência aleatória (ICA)	39
Tabela 6 – Classificação dos índices de suscetibilidade a deslizamentos de terra	71
Tabela 7 – Classificação dos índices de vulnerabilidade a deslizamentos de terra	74
Tabela 8 – Matriz de Confusão para a variável uso e cobertura do solo do município de Cunha para 2011	75
Tabela 9 - Acurácia do Produtor (AP) para as classes de UCS de Cunha no ano de 2011	76
Tabela 10 - Acurácia do Usuário (AU) para as classes de UCS de Cunha no ano de 2011	76
Tabela 11 – Cicatrizes e pesos para a variável pedologia do município de Cunha	77
Tabela 12 – Cicatrizes e pesos para a variável litologia do município de Cunha.....	78
Tabela 13 – Cicatrizes e pesos para a variável uso e cobertura do solo do município de Cunha	79
Tabela 14 – Cicatrizes e pesos para a variável declividade do município de Cunha	80
Tabela 15 – Cicatrizes e pesos para a variável curvatura horizontal do município de Cunha..	81
Tabela 16 – Cicatrizes e pesos para a variável curvatura vertical do município de Cunha.....	81
Tabela 17 – Cicatrizes e pesos para a variável distância da malha viária do município de Cunha	82
Tabela 18 – Pesos para cada variável referente a cicatriz com vítimas fatais	83
Tabela 19 – Matriz de comparação das variáveis da suscetibilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha.....	84
Tabela 20 – Limiares de criticidade para as classes de vulnerabilidade.....	93
Tabela 21 – Densidade de deslizamentos de terra (DD) por km ²	94
Tabela 22 – Distribuição das classes da pedologia dentre a vulnerabilidade muito alta	95

Tabela 23 – Distribuição das classes da litologia dentre a vulnerabilidade muito alta	96
Tabela 24 – Distribuição das classes da uso e cobertura do solo dentre a vulnerabilidade muito alta	97
Tabela 25 – Distribuição das classes da declividade dentre a vulnerabilidade muito alta	97
Tabela 26 – Distribuição das classes das curvaturas horizontal e vertical dentre a vulnerabilidade muito alta	98
Tabela 27 - Distribuição das classes da distância da malha viária dentre a vulnerabilidade muito alta	99
Tabela 28 – Valores obtidos para as 10 cicatrizes do bairro da Barra do Bié.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Processo Hierárquico Analítico (do inglês <i>Analytic Hierarchy Process</i>)
AP	Acurácia do Produtor
AU	Acurácia do Usuário
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CEPED	Atlas Brasileiro de Desastres Naturais
CPC	Coefficiente de Precipitação Crítica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRED	Centro de Pesquisa de Epidemiologia em Desastres
CV	Curvatura Vertical
DD	Densidade de Deslizamentos de Terra
DEC	Declividade
DMV	Distância da Malha Viária
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GCM	Modelo Climático Global
GCS	Sistema de Coordenadas Geográficas (do inglês <i>Geographic Coordinate System</i>)
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite (do inglês <i>Global Navigation Satellite System</i>)
GTS	Sistema Global de Telecomunicações (do inglês <i>Global Telecommunication System</i>)
ha	<i>hectare</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
ICA	Índice de Consistência Aleatória
IDW	Inverso da Distância ao Quadrado (do inglês <i>Inverse Distance Weighted</i>)
IMGS	Índice Médio Geral de Suscetibilidade
IMVD	Índice Médio de Vulnerabilidade Diária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
km	kilômetros
LIT	Litologia
m	metros
MAXPA5	Máxima Precipitação Acumulada de 5 dias
MDE	Modelo Digital de Elevação
MHE	Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert
mm	milímetros
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PA5	Precipitação Acumulada de 5 dias

PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PD	Precipitação Diária
PED	Pedologia
RC	Razão de Consistência
RCM	Modelo Climático Regional
RCP	do inglês <i>Representative Concentration Pathways</i>
S	Suscetibilidade a deslizamentos de terra
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SVM	do inglês <i>Support Vector Machine</i>
TOPODATA	Banco de dados Geomorfométricos do Brasil
UC	Unidade de Conservação
UCS	Uso e Cobertura do Solo
UTM	Universal Transversal de Mercator
V	Vulnerabilidade a deslizamentos de terra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	DESASTRES NATURAIS	21
3.1.1	Movimentos gravitacionais de massa	22
3.1.2	Deslizamentos de terra	25
3.2	SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA	27
3.2.1	Fatores que impactam o meio físico	27
3.3	VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA	32
3.3.1	Fatores climáticos que impactam o meio físico	32
3.4	PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	34
3.5	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) – SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AOS DESASTRES NATURAIS	35
3.5.1	O Processo Analítico Hierárquico – AHP, em ambiente SIG	36
4	ÁREA DE ESTUDO	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	40
4.1.1	Pedologia	43
4.1.2	Litologia	46
4.1.3	Uso e cobertura do solo	48
4.1.4	Declividade	50
4.1.5	Curvaturas horizontal e vertical	52
4.1.6	Distância da malha viária	55
4.1.7	Dados climáticos de Cunha	57
5	MATERIAIS E MÉTODOS	65

5.1	ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS GEORREFERENCIADOS	65
5.2	ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS GEORREFERENCIADOS	66
5.3	LEVANTAMENTO DAS CICATRIZES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA E PESOS ADOTADOS.....	69
5.4	EQUAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA E MAPA TEMÁTICO	70
5.5	MAPAS TEMÁTICOS DA PRECIPITAÇÃO	72
5.5.1	Equação da vulnerabilidade a deslizamentos de terra e mapa temático.....	73
5.6	PROJEÇÕES CLIMÁTICAS ETA HADGEM-ES RCP 4.5 E NOVOS EVENTOS ENTRE 2023 E 2040.....	74
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
6.1	RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VARIÁVEL AMBIENTAL USO E COBERTURA DO SOLO	75
6.2	IDENTIFICAÇÃO DO NÚMERO DE CICATRIZES E SEUS PESOS PARA CADA VARIÁVEL	77
6.2.1	Pedologia	77
6.2.2	Litologia.....	78
6.2.3	Uso e cobertura do solo	79
6.2.4	Declividade	80
6.2.5	Curvatura Horizontal	80
6.2.6	Curvatura Vertical.....	81
6.2.7	Distância da malha viária	82
6.3	SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO MUNICÍPIO DE CUNHA – MAPA FINAL	83
6.4	VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO MUNICÍPIO DE CUNHA 89	
6.4.1	Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra.....	89
6.4.1.1	Pedologia	95
6.4.1.2	Litologia.....	95

6.4.1.3	Uso e cobertura do solo	96
6.4.1.4	Declividade	97
6.4.1.5	Curvaturas horizontal e vertical	98
6.4.1.6	Distância da malha viária.....	98
6.4.2	Análise do bairro da Barra do Bié – região onde houve mortes em 2010 em decorrência dos deslizamentos	99
6.5	PROJEÇÕES CLIMÁTICAS ETA HADGEM-ES RCP 4.5 – OCORRÊNCIA DE NOVOS EVENTOS ENTRE 2023 E 2040.....	102
7	CONCLUSÕES.....	103
	REFERÊNCIAS.....	106

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais têm apresentado recorrência e impactos cada vez maiores nos dias atuais, sendo responsáveis por expressivos prejuízos de cunho ambiental, econômico e social (TOMINAGA *et al.*, 2009). Diante do aumento expressivo das ocorrências nas últimas décadas, a humanidade vem sendo desafiada a adotar posturas mais efetivas de solução. A partir das décadas de 1960, 1970 e 1980, com o acelerado crescimento urbano seguido de uma precária organização em suas ocupações, houve um aumento considerável de danos materiais e vítimas fatais em decorrência destes eventos. Isso mobilizou não só a comunidade científica como também instituições internacionais, como a Organização das Nações Unidas - ONU, a voltarem esforços para a prevenção e redução dos desastres naturais (RECKZIEGEL, 2007).

No Brasil, os tipos de desastres mais recorrentes são as inundações e os deslizamentos de terra, com 61,8% e 15% dos registros, respectivamente (RODRIGUES, 2013). Índices pluviométricos elevados causam a saturação do solo, e se associados a processos de ocupação em setores de risco, podem desencadear deslizamentos de terra. Do ponto de vista ambiental, a ocorrência de deslizamentos acelera e intensifica novos movimentos de massa, promovendo irreversíveis impactos na fauna e flora local. Como prejuízos sociais pode-se destacar traumas de magnitude psicológica nas vítimas, o que eleva os gastos com saúde e a realocação dessas pessoas para outros estabelecimentos, muitas das vezes provisórios (TONIAZZO *et al.*, 2018).

Em países de elevada urbanização e com alta desigualdade social, as alternativas habitacionais de populações de baixa renda tem se reduzido, restando a ocupação em locais ambientalmente inadequados, ausentes de planejamento urbano e infraestrutura (ROSA FILHO, 2010). Este descontrole é um dos principais fatores de redução da resiliência das cidades, deixando-as mais vulneráveis se associadas às mudanças climáticas (PBMC, 2014). Uma das consequências destas mudanças é a alteração no regime de chuvas e aumento na frequência e intensidade dos índices pluviométricos, acarretando eventos extremos de clima (PBMC, 2014 *apud* PEREZ, *et al.* 2020). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2021) indica o aumento de temperaturas globais na faixa de 1,2 a 1,7 °C e dos extremos de chuva em 7% para cada 1 °C, para o período de 2021 a 2040 (IPCC, 2021). Assim, as populações desses locais, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil, estão mais expostas e vulneráveis aos perigos decorrentes dos extremos climáticos e suas mudanças, tanto pela fragilidade de suas habitações, como pela dificuldade de reação ao meio (SILVA, L., 2014). Tendo em vista estes fatores, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2017) revela que 3.463 pessoas morreram no Brasil entre 1988 e 2016, por conta de eventos de deslizamentos de terra,

reforçando a importância da prevenção destes eventos de magnitude extrema.

Diante deste cenário, um exemplo de localidade com grande ocorrência deste tipo de desastre natural e com poucos estudos acerca do tema, é o município de Cunha, situado no estado de São Paulo. O município tem sofrido uma mudança abrupta no uso e ocupação de suas áreas, acarretando problemas ambientais em seu território. Segundo a publicação “População em áreas de risco no Brasil”, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, até 2017 existiam no município de Cunha 853 domicílios localizados em áreas de risco e habitados por 2.680 pessoas, equivalendo a 12,3% do total de sua população de 21.866 habitantes (IBGE, 2010; CEMADEN, 2018). Em janeiro de 2010 fortes chuvas atingiram o Vale do Paraíba, desencadeando deslizamentos de terra no município de Cunha e culminando na morte de seis pessoas (TERRA, 2010).

Desta maneira, há uma crescente importância em desenvolver métodos que busquem interpretar áreas vulneráveis, no contexto das mudanças climáticas, considerando as diferentes escalas de ocorrência dos fenômenos e agregando dados que interajam de múltiplas maneiras e em distintas situações (SILVA, L., 2014). Assim, destaca-se recentemente a utilização de tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na identificação dessas áreas, a citar os estudos de Canavesi *et al.* (2013), Silva, L. (2014) e Pacheco, Kux e Mendes (2020) que mapearam, respectivamente: áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Paraibuna/SP; a bacia hidrográfica do Rio Bengalas, pertencente ao município de Nova Friburgo/RJ; e um bairro do município de Campos do Jordão/SP. A integração de dados, como: tipo de solo, topografia, uso e ocupação do solo, entre outros, auxiliaram na elaboração de prognósticos mais confiáveis acerca das características e possibilidades em suas áreas de estudo.

Portanto, neste contexto de mudanças climáticas e na função da pesquisa científica como ícone essencial para a redução de desastres naturais, o presente estudo tem por objetivo identificar as principais áreas urbanas e sobretudo rurais suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra do município de Cunha, tendo como base os eventos ocorridos em janeiro de 2010. Tais resultados serão alcançados por intermédio do *software* de SIG, ArcGIS® 10.8. Visa-se também projetar eventos de precipitação pluviométrica no município para o período de 2023 a 2040. Espera-se que os resultados neste projeto sejam importantes provedoras de bases científicas para tomadas de decisões sobre estas áreas, prevenindo e/ou mitigando futuros novos desastres no município de Cunha.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Este estudo tem como objetivo principal a investigação e análise das áreas suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra do município de Cunha - SP, com projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 para o período de 01/01/2023 a 30/12/2040. Para a obtenção destes resultados serão utilizados Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e adaptações à metodologia desenvolvida por Silva, L. (2014) para a suscetibilidade.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Levantamento dos dados georreferenciados das variáveis pedologia (PED), litologia (LIT), uso e cobertura do solo (UCS), declividade (DEC), curvatura horizontal (CH), curvatura vertical (CV) e distância da malha viária (DMV) do município de Cunha;
- b) Levantamento do número de cicatrizes de deslizamentos de terra ocorridos em 01/01/2010 no município de Cunha por meio das imagens de satélite do *Google Earth* e posterior cálculo dos índices de suscetibilidade a deslizamentos de terra para as variáveis correspondentes. Adaptação da modelagem de cálculo da suscetibilidade a deslizamentos de terra desenvolvida por Silva, L. (2014) e investigação das áreas suscetíveis, segundo as classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta;
- c) Levantamento dos dados meteorológicos em Cunha desde 01/01/2000 das variáveis precipitação diária (PD), coeficiente de precipitação crítica (CPC), precipitação acumulada de 5 dias (PA5) e máxima precipitação acumulada de 5 dias (MAXPA5) para posterior cálculo da vulnerabilidade a deslizamentos de terra, por meio da modelagem desenvolvida por Silva, L. (2014), e investigação das áreas vulneráveis a, segundo as classes: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta; e
- d) Levantamento das projeções climáticas para o município de Cunha a partir do modelo climático global Eta-HADGEM-ES, e com cenário de mudanças climáticas propostos pela projeção RCP 4.5, para o período de 01/01/2023 a 30/12/2040, e identificação e contabilização da quantidade de diferentes datas com possíveis novas ocorrências de deslizamentos de terra.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DESASTRES NATURAIS

Segundo a definição de Alexander (1993) *apud* Reckziegel (2007), os desastres naturais (em inglês, “*Natural Disasters*”) podem ser entendidos como impactos rápidos, instantâneos ou prolongados do meio ambiente natural sobre o sistema socioeconômico. As catástrofes constituem ocorrências em que os prejuízos materiais e/ou humanos ocorrem em grande escala e cuja gestão exige recursos para além das possibilidades de uma região de um país, ou mesmo do próprio país como um todo. Este termo contempla tanto terremotos e tsunamis, quanto fenômenos mais corriqueiros, com ocorrência espontânea ou induzida pelo homem, como por exemplo, as inundações, erosões e deslizamentos (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Estes desastres são desencadeados por processos que envolvem grande número de variáveis geofísicas, podendo citar o relevo, vegetação, rios, precipitação, entre outras; além das humanas, como população, ocupação do solo, pobreza, atividades econômicas, educação etc. (SAUSEN e LACRUZ, 2015).

O Centro de Pesquisa de Epidemiologia em Desastres (CRED), da Universidade de Louvain, conhecido como *Emergency Events Database* (EM-DAT), é o órgão mundial responsável por elaborar um banco de dados que compreende e categoriza os desastres naturais em países de todos os continentes. Assim, para que um desastre seja considerado pelo EM-DAT, deve-se atender pelo menos um dos seguintes critérios (SAUSEN e LACRUZ, 2015):

- Dez ou mais pessoas mortas;
- Cem ou mais pessoas afetadas;
- Declaração do estado de emergência; e/ou
- Pedido de assistência internacional.

No Brasil, a iniciativa de organizar as ocorrências de desastres naturais se deu pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), que publicou o Atlas brasileiro de desastres naturais (CEPED), o qual analisou os desastres naturais mais recorrentes no país no período de 1991 a 2010 (SAUSEN e LACRUZ, 2015). Desde 2011, o país conta com o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), especializado no monitoramento dessas ameaças naturais. O Centro se utiliza de tecnologias de monitoramento e previsões hidrometeorológicas e geodinâmicas, além de desenvolver indicadores para os alertas, bem como na prevenção e mitigação desses desastres (CEMADEN, 2016).

3.1.1 Movimentos gravitacionais de massa

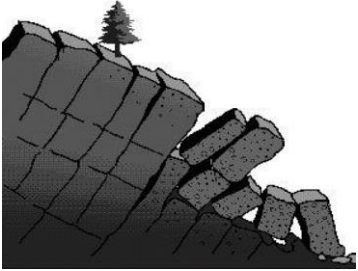
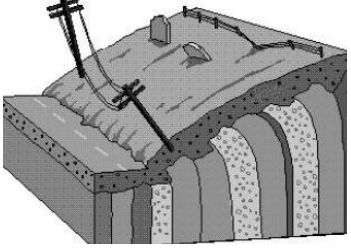
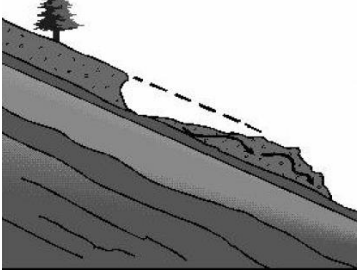
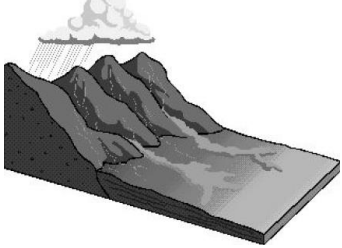
Segundo a definição de Tominaga (2009), os movimentos de massa são entendidos como movimentos de solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos. Ocorrem basicamente quando as forças de tração, dadas pela gravidade atuando na declividade do terreno, superam as forças de resistências, principalmente as forças de atrito (PEIXOTO, 2022). A principal força de tração que causa movimentos de massas é a força de cisalhamento. Quando esta supera o atrito, ocorre o movimento (MONTGOMERY, 1992).

O Brasil é considerado um país muito suscetível aos movimentos de massa devido às condições climáticas marcadas por verões de chuvas intensas em regiões de grandes maciços montanhosos (GUIMARÃES, 2008). As atividades antrópicas como cortes em talude, aterros, depósitos de lixo, alterações na drenagem, desmatamentos, entre outras, têm aumentado a vulnerabilidade das encostas para a formação desses processos (FERNANDES, 2001). Se somadas as ocupações irregulares, sem a correta infraestrutura, em áreas com declividades acentuadas, essa condição é agravada (CEMADEN, 2016). Por conta disto, nos centros urbanos, sobretudo de países subdesenvolvidos, os movimentos de massa têm tomado proporções catastróficas (SEPÚLVEDA; PETLEY, 2015).

A recorrência dos movimentos de massa ganharam grande destaque em 2022, onde em janeiro ocorreu uma tragédia em Capitólio/MG, em que um bloco de rocha se soltou do maciço rochoso e tombou, atingindo e levando a óbito 10 turistas na represa de Furnas. Essas zonas de trincas são intensificadas por intemperismos químicos, físicos e biológicos, aumentando as fraturas e o desprendimento destes blocos (PALADINO, 2022). Além disto, cita-se também no mês seguinte chuvas extremas na Região Serrana do Rio de Janeiro, mais especificamente em Petrópolis, cuja intensidade de 260 mm em 6 horas desencadeou diversas enxurradas e movimentos de massa que acarretaram ao menos em 231 mortes (G1, 2022). No mês de março de 2022, precipitações de chuva de 694 a 809 mm atingiram sobretudo o município de Angra dos Reis, também no estado do Rio de Janeiro, onde novamente deslizamentos de terra aconteceram e desencadearam ao menos 7 mortes (UOL, 2022).

Como mencionado, os movimentos gravitacionais de massa podem ser de diversos tipos, pois abrangem uma variedade de materiais e processos. Na literatura nacional, a classificação proposta por Augusto Filho (1992) é amplamente adotada, conforme elucidada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Principais tipos de movimentos de massa em encostas

Processos	Dinâmica / geometria / material
<p data-bbox="331 398 523 432">Quedas (<i>falls</i>)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento; • Movimentos do tipo queda livre ou em plano inclinado; • Material rochoso; • Pequenos e médios volumes; • Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. <ul style="list-style-type: none"> • Rolamento de matacão; e • Tombamento.
<p data-bbox="320 790 534 824">Rastejos (<i>creep</i>)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento; • Velocidade muito baixa (cm/ano) a baixa e decrescente com a profundidade; • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; e • Solo, depósitos e rocha alterada/fraturada.
<p data-bbox="277 1149 576 1182">Deslizamentos (<i>slides</i>)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos); • Velocidade média (m/h) a alta (m/s); • Pequenos a grandes volumes de material; e • Geometria e materiais variáveis: <ul style="list-style-type: none"> • Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; • Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; e • Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.
<p data-bbox="320 1675 534 1709">Corridas (<i>flows</i>)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento; • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; • Desenvolvimento ao longo das drenagens; • Velocidade média a alta; • Mobilização de solo, rocha, detritos e água; e • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Augusto Filho (1992).

Pelas definições de Tominaga (2009), define-se uma queda de blocos como uma ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação, sendo este tipo de movimento gravitacional de massa comum, sobretudo nas escarpas da Serra do Mar. Nos penhascos ou taludes íngremes, blocos e/ou lascas dos maciços rochosos deslocados pelo intemperismo, caem pela ação da gravidade. A queda pode estar associada a outros movimentos como saltação, rolamento dos blocos e fragmentação no impacto com o substrato. As causas das quedas de blocos são diversas, podendo citar a: variação térmica do maciço rochoso, perda de sustentação dos blocos por ação erosiva da água, alívio de tensões de origem tectônica, vibrações e outras.

Os rastejos, por sua vez, são caracterizados por movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites indefinidos. Envolvem, muitas vezes, grandes volumes de solos, sem que apresente uma diferenciação visível entre o material em movimento e o estacionário, sendo visíveis apenas após um médio/longo período. Podem provocar danos a obras e estruturas situadas nas encostas, tendendo a evoluir para deslizamentos. Indicativos desse processo estão relacionados à ocorrência de trinca em paredes, árvores e postes inclinados e degraus de abatimento formados nas encostas (SANTOS, 2007). A causa da movimentação nos rastejos é a ação da gravidade, associada também aos efeitos das variações de temperatura e umidade. O processo de expansão e contração da massa de material, devido à variação térmica, provoca o movimento, vertente abaixo (TOMINAGA, 2009).

Corridas são movimentos rápidos de escoamento de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno das partículas de solo, em decorrência da destruição de sua estrutura interna, na presença de excesso de água. Estes movimentos são gerados a partir de grande quantidade de materiais tais como solo, rocha e árvores que, ao atingirem as drenagens, formam uma massa de elevada densidade e viscosidade. Mesmo em áreas pouco declivosas, a massa deslocada pode atingir grandes distâncias com extrema rapidez, ocasionando consequências altamente destrutivas muito maiores que os deslizamentos, por exemplo (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; FERNANDES; AMARAL, 1996; LOPES, 2006 *apud* TOMINAGA, 2009).

O termo deslizamento tem diversos sinônimos de uso mais generalizado na linguagem popular como escorregamento, queda de barreira, desbarrancamento, os quais equivalem ao *landslide* da língua inglesa. Os deslizamentos são movimentos rápidos, de porções de terrenos, o qual incluem solos e rochas, com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente (TOMINAGA, 2009).

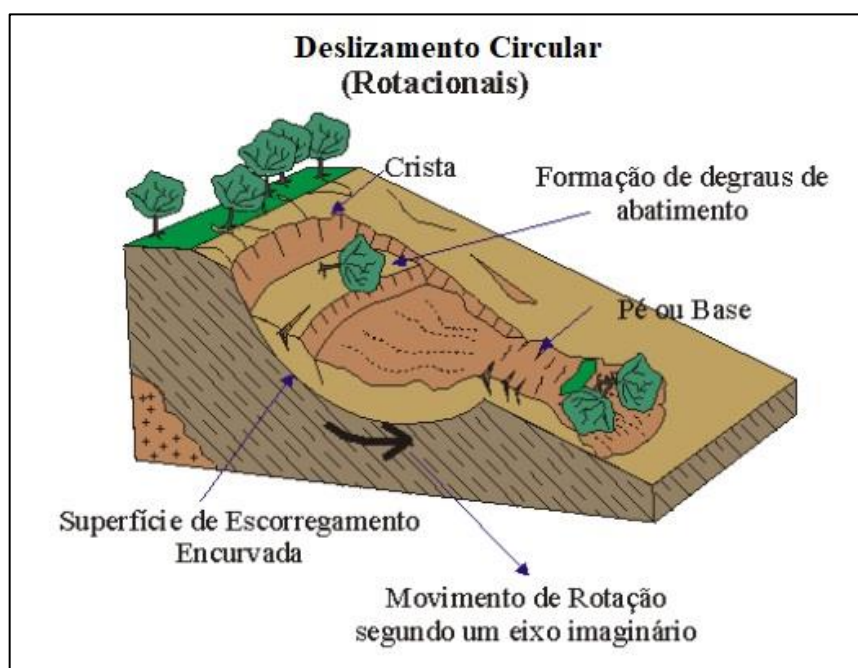
3.1.2 Deslizamentos de terra

De maneira geral, os deslizamentos são caracterizados por movimentos rápidos, da ordem de m/h a m/s com efeito de duração relativamente curto, cujos limites laterais e profundidades são bem definidos e seu centro de gravidade se desloca no sentido de cima para baixo e para fora do talude. Estes são os processos mais marcantes na evolução natural das encostas, seja pela frequência com que ocorrem, seja pelo potencial de causar danos ao homem (SAUSEN e LACRUZ, 2015).

Existem diversas classificações de deslizamentos, sendo as mais comuns baseadas na forma do plano de ruptura e no tipo de material em movimento. A classificação pelo tipo de material em movimento pode envolver somente solo, solo e rocha, somente rocha, tálus, colúvio, detritos ou ainda materiais oriundos de depósitos de lixo (FERNANDES e AMARAL, 2003; RODRIGUES, 2013).

Os deslizamentos circulares (rotacionais) possuem superfícies de deslizamento curvas, onde podem ocorrer sucessivas rupturas combinadas. Geralmente ocorrem em aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas (PEIXOTO, 2022) Esses movimentos possuem também uma superfície de ruptura côncava para cima, sendo um de seus principais fatores condicionantes o corte na base do material. (RODRIGUES, 2013). A Figura 1 a seguir apresenta um esquema deste tipo de movimento.

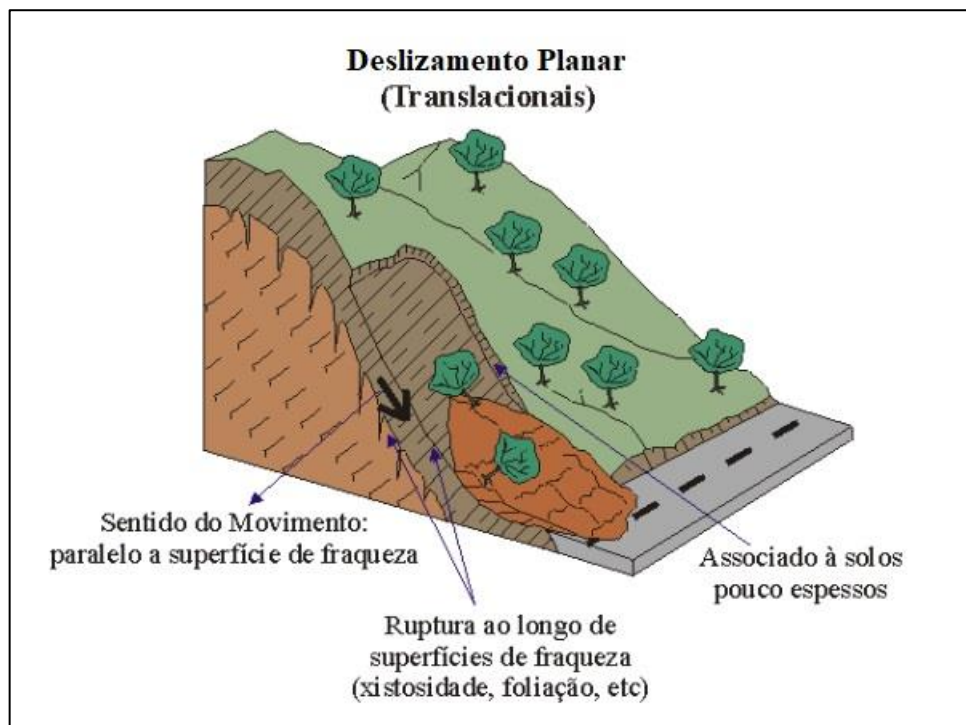
Figura 1 – Esquema de deslizamento circular (rotacional)



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

Os deslizamentos planares, por sua vez, são processos frequentes nas encostas serranas brasileiras, e envolvem solos superficiais, com rupturas que podem ocorrer no contato com a rocha subjacente. O movimento é condicionado por estruturas geológicas planares desfavoráveis a estabilidade, tais como: xistosidade, fraturamento, foliação etc. (PEIXOTO, 2022). Esses deslizamentos são mais frequentes que os primeiros e ocorrem normalmente durante períodos de chuva intensa. Possuem a superfície de ruptura plana e normalmente acompanham as descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no material. Normalmente, são deflagrados em encostas íngremes, com presença de solos delgados, com o plano de ruptura variando entre 0,50 e 5,00 m de profundidade (RODRIGUES, 2013). A Figura 2 a seguir apresenta um esquema de deslizamento planar.

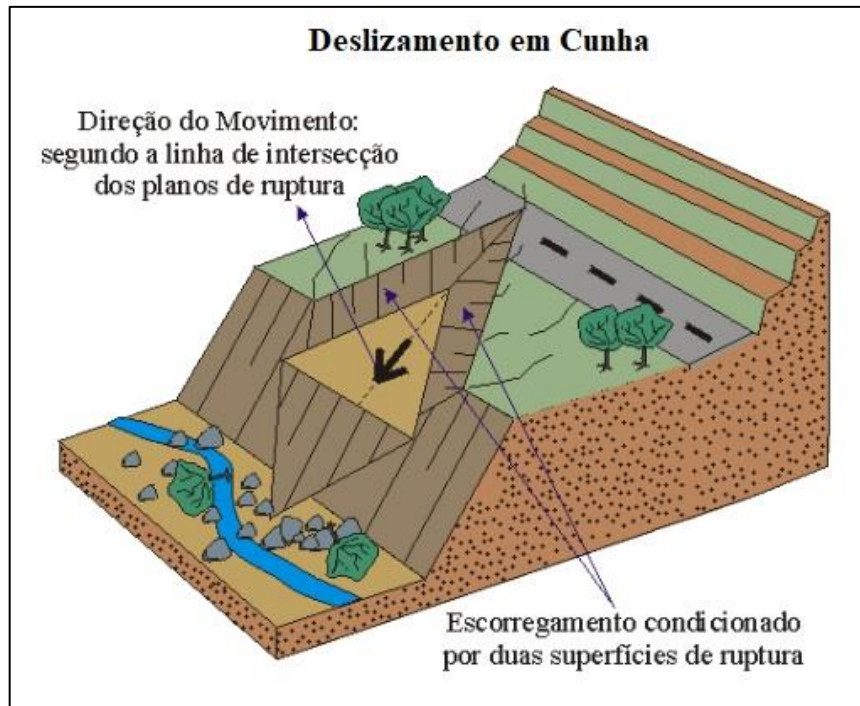
Figura 2 – Esquema de deslizamento planar (translacional)



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

Os deslizamentos em cunha estão associados a saprolitos e maciços rochosos, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. São comuns em taludes de corte ou encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (PEIXOTO, 2022). A Figura 3 a seguir apresenta um esquema de deslizamento em cunha.

Figura 3 – Esquema de deslizamento em cunha



Fonte: Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

3.2 SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA

Segundo alguns autores, a suscetibilidade é entendida como a propensão do terreno para a ocorrência de um tipo particular de movimento de terra, com base em um conjunto de fatores de predisposição à instabilidade geomorfológica (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

Neste estudo, por sua vez, será adotado o conceito de suscetibilidade apresentado por Silva, L. (2014), em que a suscetibilidade a deslizamentos de terra é entendida como sendo a disposição, a tendência ou a sensibilidade que uma determinada área geográfica tem em sofrer este tipo de desastre. Sendo assim, para que a suscetibilidade a deslizamentos de terra de qualquer área seja avaliada, são necessárias análises detalhadas de variáveis ambientais que condicionam sua ocorrência.

3.2.1 Fatores que impactam o meio físico

Os movimentos de massa que atuam no relevo das encostas abrangem uma variedade de tipos de movimentos de solos, rochas ou detritos. As diversas interações entre os fatores condicionantes e as intervenções antrópicas são os principais fatores que interferem nas condições de equilíbrio das encostas. Estes movimentos podem ser gerados por diversos fatores, como por exemplo pela ação da gravidade, em terrenos declivosos e inclinados, tendo como

fator deflagrador principal a infiltração de água, principalmente das chuvas. Estes movimentos podem ser induzidos, quando gerados pelas atividades humanas que modificam as condições naturais para adaptação às suas necessidades de ocupação (MARQUES, 2011).

Os condicionantes para a ocorrência de deslizamentos de terra podem ser divididos em duas classes: naturais e antrópicos. Com relação aos naturais pode-se citar as características dos solos e rochas (depósitos e estruturas geológicas), características geomorfológicas, como o relevo (inclinação, forma e amplitude da encosta), vegetação, clima (destaque para o regime pluviométrico) e nível d'água (superficiais e subsuperficiais). Quanto aos condicionantes antrópicos cita-se o adensamento da ocupação, cortes e aterros, desmatamento/cultivo inadequado, lançamento de lixo e entulho e vazamentos de tubulação/lançamento de águas servidas na superfície/fossas sanitárias (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998; BRASIL, 2006).

a) Pedologia

Os solos podem influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, em virtude da sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade (MARCELINO, 2004). A textura de um solo refere-se à proporção relativa das partículas sólidas, influenciando na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva (BIGARELLA; BECKER; PASSOS, 1996).

A permeabilidade está intimamente ligada à porosidade, ou seja, em geral solos arenosos são mais permeáveis do que solos argilosos, por serem mais porosos (CAPUTO, 1977 *apud* FIORI; CARMIGNANI, 2001). Uma vez que a porosidade e a permeabilidade são inversamente proporcionais à densidade, estes parâmetros estão diretamente impactados na relação entre volume e a massa total de solo (FIORI, 1995; FIORI; CARMIGNANI, 2001).

Além destes fatores, as discontinuidades presentes no solo também podem gerar um plano potencial de ruptura. A abrupta diminuição da condutividade hidráulica favorece a geração de fluxos d'água subsuperficiais, que diminuem a resistência ao cisalhamento nas zonas de contato. Somado a este fator, a presença de grande quantidade de água aumenta o peso específico do solo, favorecendo o deslocamento da massa pela ação da gravidade (MARCELINO, 2004).

b) Litologia

Lepsch (2002) menciona que a litologia, mesmo exercendo um “papel passivo” à ação climática e orgânica, influencia no tipo de solo (material mineral), como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria etc.).

Os demais fatores condicionantes, a citar as características estruturais, tais como as falhas, fraturas, bandamentos, foliações e inclinação das camadas, estão diretamente vinculadas ao tipo de rocha (litologia) (SELBY, 1982; FIORI, 1995).

A natureza da rocha é importante porque, em função da presença ou ausência de minerais resistentes como o quartzo, determina o comportamento mecânico e mineralógico do regolito. Esta variação de comportamento que é responsável pela origem dos planos potenciais de ruptura no contato entre solo-rocha (FIORI, 1995; LOPES, 1995 *apud* MARCELINO, 2004).

As características estruturais que representam os pontos de menor resistência e descontinuidades desempenham papel fundamental na infiltração e circulação da água, e, conseqüentemente, atuam como caminhos preferenciais de alteração (MARCELINO, 2004). O tipo de rocha define a permeabilidade de uma área e sua resistência ao intemperismo. Rochas muito fraturadas, por exemplo, podem gerar pontos de descontinuidade e menor resistência a processos erosivos (SILVA, M., 2008).

c) Uso e cobertura do solo

A vegetação assume um importante papel na proteção do solo principalmente contra os processos erosivos superficiais. Vegetações arbóreas auxiliam como reforço e contenção mecânica pelas raízes e caules, tal como na modificação da hidrologia da encosta, como por exemplo pelo processo da evapotranspiração (MARCELINO, 2004).

Entretanto, segundo Raphael (2012) e Pinho *et al.* (2012) movimentos de massa podem ocorrer em regiões vegetadas. Em um estudo destes autores em Nova Friburgo/RJ, 50% dos movimentos de massa ocorreram em áreas vegetadas. Os autores relatam que tal condição pode advir da vegetação estar situada em áreas muito declivosas, além de estarem associados a processos de saturação do solo. Em outras palavras, tais fatores não podem ser avaliados de maneira isolada.

Segundo Silva M. (2008), a intervenção humana em encostas normalmente contribui para acelerar os processos de denudação. Em casos de construções de estradas e rodovias além de habitações de baixo padrão em áreas irregulares podem ocasionar a desestabilização das vertentes devido ao aumento do peso na encosta. A alteração da declividade do corte e preenchimento do talude, além da reorganização da rede de drenagem são outros fatores bem impactados com a intervenção antrópica. Esse papel das atividades humanas como agente deflagrador de deslizamentos é massivamente ampliado sobretudo em períodos de precipitação mais intensa (RODRIGUES, 2013).

d) Condicionantes geomorfológicos

Entre os condicionantes geomorfológicos, destacam-se a forma das vertentes e as variáveis morfométricas dissecação, declividade, orientação de vertente e amplitude do relevo (RODRIGUES, 2013).

i) Declividade

A declividade das encostas são importantes fatores no processo de instabilização das vertentes, principalmente quando apresentam o mesmo sentido de inclinação das fraturas e planos de falhas ou de foliação, formando planos potenciais de deslizamentos (SELBY, 1982; FIORI, 1995). A inclinação das encostas fornece informações sobre as que se encontram mais expostas às variáveis climatológicas, como por exemplo, vento e insolação (MARQUES, 2004).

A orientação das encostas afeta indiretamente a resistência ao cisalhamento em virtude de estar relacionada à presença de umidade e de cobertura vegetal (DONATI; TURRINI, 2002). A velocidade do deslocamento e capacidade de transporte de material são proporcionais à inclinação e ao comprimento de rampa (LOPES, 1995). A inclinação contribui com o incremento da atuação da força gravitacional sobre a cobertura de solo, onde quanto maior a declividade maior será a componente vertical da gravidade (MARCELINO, 2004).

Estudos apontam que grande parte dos deslizamentos tem ocorrido principalmente em declividades na faixa de 20° a 45°. Fernandes e Amaral (1996) comentam que este comportamento é explicado pelas variações na presença da cobertura vegetal e pelo tipo de solo associado. Em encostas mais íngremes, por exemplo, ocorre a presença de cobertura vegetal de pequeno a médio porte e pouco desenvolvido, gerando uma condição de baixa instabilidade em virtude da baixa componente de peso (FERNANDES *et al.*, 2001).

j) Curvaturas horizontal e vertical

Entretanto, Fernandes *et al.* (2001) ressaltam que a declividade sempre foi uma única variável topográfica utilizada, gerando resultados equivocados, uma vez que mesmo em encostas com declividades menos acentuadas frequentemente ocorrem deslizamentos.

Desta maneira, as curvaturas horizontal e vertical são variáveis importantes nos processos de movimentos de massa. A curvatura vertical expressa a forma da vertente quando observada em perfil, relacionando-se aos processos de migração e acúmulo de material através da superfície (VALERIANO, 2008). A curvatura horizontal, por sua vez, expressa a forma da

vertente quando observada em projeção horizontal, estando relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo no solo, tendo importante papel sobre o balanço hídrico (VALERIANO, 2008). A combinação dessas classes de curvaturas indica a forma do terreno (RODRIGUES, 2013), e é apresentada na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Geomorfologia dos terrenos: combinação das curvaturas horizontal e vertical

		Curvatura horizontal		
		convergente	planar	divergente
Curvatura vertical	côncava			
	retilínea			
	convexa			

Fonte: Dikau (1990).

Com relação à curvatura vertical, as seções côncavas, por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são as mais favoráveis para a ocorrência de deslizamentos. Isto acontece devido à concentração de água, tanto em superfície quanto em subsuperfície, favorecendo a condição de saturação dos horizontes pedológicos (MARCELINO, 2004).

k) Distância da malha viária

Além dos efeitos causados pela remoção da cobertura vegetal, como já mencionado, os cortes em encostas, quando mal planejados, geram condições propícias à ocorrência de deslizamentos.

Zêzere *et al.* (1999), analisaram movimentos de massa ocorridos na região norte de Lisboa, em Portugal, e levantaram que dos 597 deslizamentos ocorridos, 484 (81%) ocorreram em virtude da interferência humana direta, oriundos de processos como desmatamentos, obras de

implantação e manutenção de estradas e plantios. Deste montante, 20% dos deslizamentos foram induzidos pelos cortes de encostas para a construção de edificações e da malha viária.

Guthrie (2002), por sua vez, identificou que após construções de rodovias na Ilha de Vancouver, em três bacias hidrográficas houve o incremento na ocorrência de deslizamentos em até 94 vezes. Por fim, Larsen e Torres-Sánchez (1998) verificaram que dos 4.039 escorregamentos analisados em três áreas montanhosas de Porto Rico, 1.359 (37%) estavam associados à presença de rodovias e de edificações.

Por assim dizer, a partir do momento em que o homem se apropria de uma vertente, tendo-a como suporte ou recurso, ele altera suas relações processuais morfodinâmicas, aumentando assim a ação dos processos erosivos e movimentos de massa (CASSETI, 1991).

3.3 VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA

A vulnerabilidade está relacionada a maior ou menor fragilidade de um determinado ambiente. Ela pode ser definida por três elementos: exposição ao risco; incapacidade de reação; e dificuldade de adaptação diante da materialização do risco (MOSEY, 1998).

Do ponto de vista dos desastres naturais e avaliação de risco, a vulnerabilidade pode ser vista como a interação entre o risco existente em um determinado lugar e as características, e o grau de exposição da população lá residente (CUTTER e FINCH, 2008).

Tal como a suscetibilidade, neste estudo, será adotado o conceito de vulnerabilidade apresentado por Silva, L. (2014), em que a vulnerabilidade a deslizamentos de terra é entendida como sendo a condição de risco que uma determinada área geográfica tem em sofrer tais desastres, a partir de expressiva ocorrência de precipitação de chuvas nesta área.

3.3.1 Fatores climáticos que impactam o meio físico

O papel do clima está relacionado basicamente com o regime pluviométrico e suas consequências sobre os processos morfogenéticos. Em estudos sobre movimentos de massa, procura-se estabelecer os limites críticos que deflagram os deslizamentos. Em áreas pequenas, é possível monitorar o risco de ruptura, por meio da utilização de instrumentação geotécnica, que inclui piezômetros, medidores de nível de água, inclinômetros e indicadores de deslocamento superficial (RODRIGUES, 2013). Já para áreas extensas, onde os movimentos de massa são rápidos, o melhor método para avaliar a probabilidade de ocorrência de um deslizamento é o monitoramento da intensidade e de acúmulo da precipitação (D'ORSI, 2011).

No Brasil, pesquisadores e instituições buscam estabelecer esses limiares analisando as características locais de algumas regiões. Os limites de precipitação podem ser definidos por modelos baseados por exemplo em processos físicos. Esses limiares incorporam modelos de infiltração às modelagens de estabilidade de talude, pois através da medição da pluviometria e do cálculo das taxas de infiltração, é possível determinar o momento da ruptura (D'ORSI, 2011). Estes modelos podem determinar a quantidade de precipitação necessária para deflagrar um deslizamento, bem como sua localização. Todavia, para estes modelos, são necessárias diversas informações acerca da área de referência, como hidrologia, litologia, geomorfologia, pedologia, localização e momento dos movimentos anteriores, sendo eficiente na previsão de deslizamentos de terra rasos (GUZZETTI *et al.*, 2007).

Tanto as precipitações anômalas quanto as contínuas, causam encharcamento do solo, podendo deflagrar deslizamentos de terra. Este encharcamento produz a saturação, diminui a coesão no contato solo-rocha e a resistência desse material, favorecendo o aumento das tensões cisalhantes (FERNANDES e AMARAL, 1996).

Wolle e Carvalho (1989) comentam que a ação combinada de chuva precedente, as chamadas precipitações acumuladas (PA) e de chuva intensa de curta ou média duração, como as precipitações diárias (PD) são as maiores responsáveis pela deflagração de deslizamentos em meio tropical úmido, tanto em áreas ocupadas ou alteradas quanto em áreas virgens.

Na gestão de riscos de deslizamentos, um outro parâmetro fundamental é o coeficiente de precipitação crítica (CPC). Este parâmetro indica, para um determinado local, o limite de chuva acumulada em um intervalo de tempo pré-estabelecido, limite esse cujo atingimento indica possibilidade de naquele local ocorrer deslizamentos. O coeficiente de precipitação é uma referência obtida de estudos estatísticos de correlação chuvas x deslizamentos ao longo de uma série histórica (TATIZANA *et al.*, 1987a, 1987b). O CPC, no entanto, é um notável instrumento de prevenção cujos valores são a base para a tomada de decisões em planos de contingência, ou simplesmente para adotar medidas preventivas na área em questão (PMSJC/PMRR, 2017).

Um estudo feito por Mendes *et al.* (2015) revelou que tanto a chuva diária (valores entre 20 e 50 mm/24h) quanto a precipitação acumulada de três dias (valores acima de 50 mm/72h), foram fatores fundamentais para a deflagração de deslizamentos no município de São José dos Campos/SP. Por sua vez, para Silva, L. (2014), fatores de precipitação acumulada de cinco dias se mostraram eficiente para o entendimento dos desastres que impactaram Nova Friburgo no ano de 2011.

3.4 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

Modelos climáticos são ferramentas que auxiliam na compreensão das mudanças no clima e seus impactos. Estes são conduzidos por uma série de equações diferenciais que modelam a circulação da atmosfera e do oceano de acordo com a física conhecida do sistema terrestre, produzindo aspectos climáticos simulados em uma grade espacial (MARENGO *et al.*, 2009). Além disso, estes modelos permitem a análise do clima em diferentes condições atmosféricas, contribuindo para resultados mais precisos (FONTOLAN, 2019).

Os modelos climáticos regionais (RCM), em detrimento dos modelos climáticos globais (GCM), possuem uma maior precisão para a avaliação de possíveis impactos das mudanças climáticas sobre a probabilidade de eventos climáticos extremos em uma região específica. Uma vez que os RCM podem ser acoplados aos GCM e que o modelo Eta é um RCM desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cita-se o modelo ETA-HadGEM-ES, relevante para o estudo de eventos extremos de temperatura do ar e precipitação pluvial em regiões específicas do globo terrestre, sendo uma excelente opção para avaliação de aspectos futuros de áreas menores (CHOU *et al.*, 2014 *apud* FONTOLAN, 2019).

O modelo HadGEM-ES, denominado “*The Hadley Global Environmental Model*”, foi desenvolvido para simular aspectos climáticos em conjunto com fatores biológicos. Este modelo possui representação do ciclo de carbono sobre a terra, e modifica-se de acordo com a vegetação, incluindo distinção entre tipos diferentes de árvores, além de representar a química da atmosfera, modelo de aerossol com carbono orgânico e representação de poeira (CHOU *et al.*, 2014 *apud* FONTOLAN, 2019).

Esses modelos climáticos simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antrópicas, chamado RCPs (*Representative Concentration Pathways*) (IPCC, 2013). Na projeção RCP 4.5 as emissões de metano são estabilizadas e há um leve aumento nas emissões de dióxido de carbono. Atrelada a isso, com a estabilização da demanda energética mundial, essa projeção é congruente e otimista com políticas públicas climáticas precisas, e programas de reflorestamento (SILVEIRA *et al.*, 2016). Sendo assim, os cenários climáticos RCP 4.5 possuem emissões e concentração de gases de efeito estufa, onde há alterações na temperatura e precipitação, indicando intensidade média de emissão com cenário de estabilidade (GUIMARÃES *et al.* 2016).

No presente estudo foram utilizadas projeções climáticas para o período de 2023 a 2040, através do modelo Eta-HadGEM-ES, com cenário RCP 4.5 de emissões e mudanças climáticas, sendo que estes são importantes elementos de quantificação dos deslizamentos de terra.

3.5 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) – SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AOS DESASTRES NATURAIS

Nos últimos anos houve uma mudança na forma de mapeamento, avaliação e alerta na ocorrência de desastres naturais. Isso ocorreu devido ao uso de imagens orbitais com resoluções mais refinadas, adquiridas por novos sensores como aqueles a bordo dos satélites QuickBird-2, IKONOS-2 e GeoEye-1. Com a utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), foi possível integrar dados e quantificar diversos desastres, tais como os terremotos, alagamentos e movimentos de massa (GILLESPIE *et al.*, 2007 *apud* RODRIGUES, 2013).

Mesmo que um dos principais fatores condicionantes de deslizamentos seja a ocorrência de chuvas de forte intensidade ou por períodos prolongados, o aumento na ocupação de áreas irregulares pela atividade antrópica contribui com a ocorrência deste tipo de evento (GUERRA *et al.*, 2007). Dessa forma, o uso de imagens de satélite no mapeamento da cobertura e uso da terra também é importante nos estudos sobre deslizamentos.

O potencial que os produtos de sensores remotos têm no processo de investigação dos deslizamentos pode ser dividido nas fases de: detecção e classificação dos deslizamentos; monitoramento de áreas sujeitas a deslizamentos; e análise espacial e temporal destas áreas de risco. Neste último, são geradas informações fundamentais para a prevenção desse fenômeno, sendo possível, por exemplo, identificar e mensurar a área de abrangência destes eventos. Além disso, é possível extrair das imagens vários parâmetros condicionantes do fenômeno, como cobertura vegetal, morfologia das vertentes, estruturas geológicas e atividades antrópicas, entre outras (SAUSEN; LACRUZ, 2015).

Existem várias técnicas de geotecnologias que são comumente usadas nessa fase da investigação, entre as quais é possível citar o Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS); as Imagens de satélites ópticos e *Synthetic Aperture Radar* - SAR, onde imagens ópticas com bandas do visível são as mais utilizadas para detectar onde ocorreu um deslizamento ou onde eles estão prestes a ocorrer; e a estereofotogrametria, que permitem a combinação de imagens com visadas em ângulo diferentes, proporcionando análises tridimensionais das áreas monitoradas. É importante citar que para a detecção e a classificação de deslizamentos, é necessário identificar tamanho e forma das cicatrizes deixadas nas encostas (SAUSEN e LACRUZ, 2015).

O uso dos SIG é bastante utilizado no Brasil em diversos estudos sobre deslizamentos. Segundo o estudo de Rodrigues (2013), o autor realizou um mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos de terra em Nova Friburgo/RJ através de procedimentos nos softwares de SIG

ArcGIS® 10.0, utilizando dados de declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal, com pesos atribuídos de acordo com sua influência nos processos de deslizamentos.

Já Silva, L. (2014), realizou um estudo na Bacia do Rio Bengalas, também em Nova Friburgo, onde a combinação das variáveis declividade, pedologia, litologia, uso e cobertura do solo, curvatura vertical e curvatura horizontal, proporcionou uma melhor compreensão acerca da suscetibilidade a deslizamentos de terra. Para este mesmo estudo, fatores climáticos também foram adotados a fim de se obter a vulnerabilidade a deslizamentos de terra na bacia de estudo. O autor atribuiu pesos que variaram de “0,00” a “1,00” às variáveis do meio físico de sua área de investigação e foram calculados proporcionalmente aos 183 pontos de deslizamentos de terra registrados em 12/01/2011. Em outras palavras, quando o índice é igual a 0,00, representa que não houve deslizamentos de terra.

Pacheco *et al.* (2019) estudaram as áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de terra, assim como os principais fatores que favoreceram este tipo de movimento, no bairro Britador, localizado no município de Campos do Jordão/SP. Para tanto, foi utilizado o modelo matemático *Shalstab*, que analisa a estabilidade de encostas; imagens de satélite do sensor WorldView 2; e técnicas de Mineração de Dados, a fim de identificar as características relacionadas ao uso e ocupação da área em estudo. Os resultados gerados foram validados pelas cicatrizes de deslizamento pré-existentes na área de estudo.

Por fim, Bispo *et al.* (2020) avaliaram também a suscetibilidade induzida a deslizamentos de terra no litoral norte de Maceió/AL, por meio da aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* – AHP, em ambiente SIG. Tal método será descrito no item 3.5.1 a seguir. Foram utilizados fatores relativos à geologia, geomorfologia, solos, declividade e forma do terreno e uso da terra. A análise foi realizada por meio de métodos multicritérios e álgebra de mapas com a ponderação das variáveis via AHP. Neste caso também os resultados foram validados com 29 cicatrizes de deslizamentos, identificadas em 2017.

3.5.1 O Processo Analítico Hierárquico – AHP, em ambiente SIG

O método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, possui base matemática no qual é possível organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios e checar a consistência dos julgamentos realizados, sendo desenvolvido para ajudar na tomada de decisão a partir de uma série de fatores, sejam quantitativos ou qualitativos. O fundamento da AHP consiste na decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a

uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 1990).

A tomada de decisão se inicia do ponto onde o decisor deverá julgar a intensidade de importância de cada critério em relação a outro, e os elementos são organizadas em matrizes de decisão (SAATY, 1990). Os critérios de importância são apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Escala de importância na AHP

Valores numéricos de intensidade	Definição da importância	Justificativa
1	Igual importância	As duas variáveis ou atividades contribuem igualmente ao objetivo
3	Moderadamente mais importante	Experiência e julgamento favorecem moderadamente uma sob a outra
5	Fortemente mais importante	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma sob a outra
7	Muito fortemente mais importante	Alternativa fortemente favorecida em relação a outra e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extremamente mais importante	A evidência favorece uma alternativa em relação a outra, com grau de certeza mais elevado
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando se procura uma condição intermediária entre duas definições

Fonte: Saaty (1990).

A matriz paritária da AHP é composta por elementos que devem atender três propriedades:

- **Identidade:** todos os elementos da diagonal são iguais a 1, para $i = j$. Desta maneira, $C_{ij} = 1$, onde a diagonal representa cada elemento comparado a si mesmo, ou seja, de igual importância;
- **Reciprocidade:** cada elemento acima da diagonal da matriz de comparação paritária, é igual ao inverso do elemento correspondente, situado abaixo da diagonal, isto é, $C_{ij} = 1 / C_{ji}$; e
- **Consistência ou coerência:** Racionalidade do julgamento, onde deve haver coerência/consistência na decisão. Por exemplo, se C_1 é maior que C_2 e C_2 é maior que C_3 , C_1 é maior que C_3 .

A próxima etapa para o cálculo refere-se ao “autovetor”, que define os pesos para cada critério. Este parâmetro também é definido por três etapas (SAATY, 1990 *apud* FERRÃO, 2016):

- Soma total dos elementos de cada coluna da matriz de comparação paritária;
- A normalização relativa dos pesos ocorre por meio da divisão de cada elemento da matriz pela soma total da sua respectiva coluna, conforme mostrado na Tabela 3. Após isso, a soma final de cada coluna obrigatoriamente deverá ter valor igual a 1; e
- Cálculo da média aritmética de cada linha da matriz, gerando o “autovetor” ou “vetor de prioridades”.

Por fim, a Tabela 3 apresenta uma matriz genérica com os autovetores:

Tabela 3 – Matriz com autovetores

Critérios	C₁	C₂	C_n	Soma das linhas	Autovetor
C₁	$1 / \Sigma C_1$	$(1/C_{21}) / \Sigma C_2$	$(1/C_{n1}) / \Sigma C_n$	ΣC_{1i}	$\Sigma C_{1i} / 3$
C₂	$C_{21} / \Sigma C_1$	$1 / \Sigma C_2$	$(1/C_{n2}) / \Sigma C_n$	ΣC_{2i}	$\Sigma C_{2i} / 3$
C₃	$C_{n1} / \Sigma C_1$	$C_{n2} / \Sigma C_2$	$1 / \Sigma C_n$	ΣC_{ni}	$\Sigma C_{ni} / 3$
SOMA	1	1	1	3	1

Fonte: Ferrão (2016).

Com isso, determina-se a importância de cada critério T_i e também a preferência Z_i de cada alternativa em relação a cada critério, a fim de se obter o valor global A_x de cada alternativa. A Equação 1 e a Tabela 4 apresentam o cálculo e a comparação paritária entre os critérios.

$$A_x = Z_i \cdot T_i \quad (1)$$

Tabela 4 – Comparação paritária entre as alternativas para cada critério

Critério 1	A₁	A₂	...	A_n
A₁	1			
A₂		1		
...			1	
A_n				1

Fonte: Saaty (1990) adaptado por Ferrão (2016).

Essa avaliação irá permitir determinar qual alternativa terá a maior prioridade e será recomendada como a melhor escolha.

A análise de consistência ou também chamada de análise da sensibilidade tem papel importante para se verificar a robustez do modelo, sendo obtido conforme proposições a seguir (SAATY, 1990 *apud* FERRÃO, 2016).

A condição necessária e suficiente para a consistência é que o “autovalor principal” $\lambda_{\text{máx}}$ seja igual ao número de linhas ou colunas da matriz de comparações paritárias. O autovalor é calculado através da Equação 2.

$$\lambda_{\text{máx}} = \Sigma T . W \quad (2)$$

Onde:

T = autovetor normalizado; e

W = soma das colunas de matriz de comparação.

O índice de consistência (IC) de uma matriz de comparação paritária indica quanto o autovalor está afastado do valor teórico esperado n. Esse desvio é dado pela expressão $(\lambda_{\text{máx}} - n)$. Essa diferença é medida em relação ao número de graus de liberdade da matriz (n - 1), conforme apresentado na Equação 3.

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n - 1)} \quad (3)$$

A Razão de Consistência (RC) calculada pela Equação 4, é a comparação entre o índice de consistência (IC) com o “índice de consistência aleatória” (ICA). Este valor é retirado da Tabela 5.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad (4)$$

Tabela 5 – Índice de consistência aleatória (ICA)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ICA	-	-	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1990).

Segundo Saaty (1980), valores de RC inferiores a 0,10 indicam que não houve inconsistência nos valores atribuídos aos julgamentos, e valores superiores indicam que os julgamentos realizados precisam ser revistos.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Cunha, situado no Estado de São Paulo, tem uma extensão territorial de 1.407,25 km² (SEADE, 2019). Limita-se com os municípios de Ubatuba, São Luiz do Paraitinga, Lagoinha, Guaratinguetá, Lorena, Silveiras, Areias, São José de Barreiro no estado de São Paulo, e de Angra dos Reis e de Paraty no estado do Rio de Janeiro (PECC, 2019), conforme Figura 5. Cunha é uma estância climática localizada entre as Serras da Quebra-Cangalha, da Bocaina e a do Mar, na Latitude: 23° 04' 28" S e Longitude: 44° 57' 35" W.

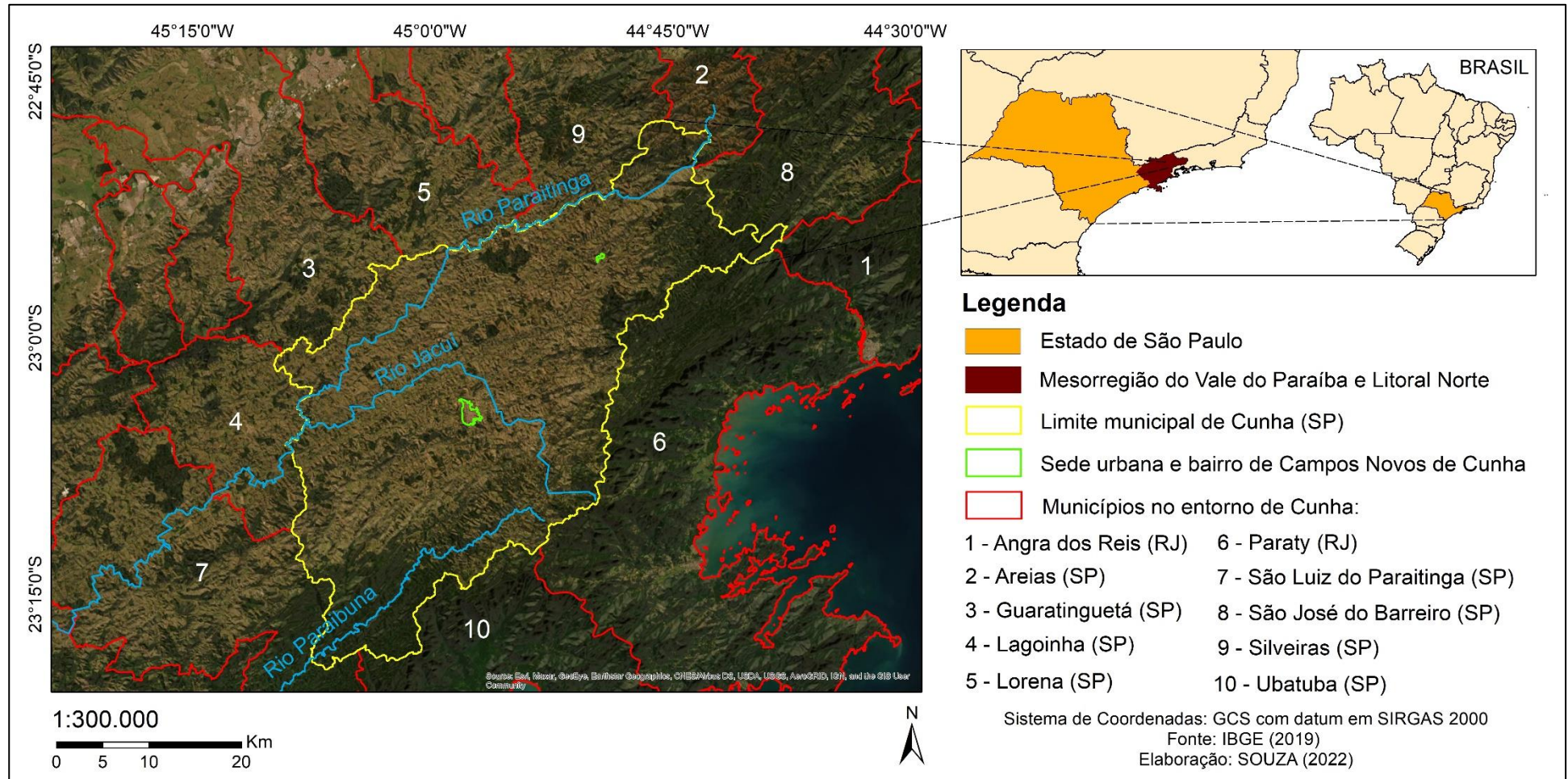
As terras do município de Cunha abrigam as nascentes dos rios Jacuí e Paraibuna, e grandes áreas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga, formadores da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, que abrange 3 estados e abastece em torno de 14 milhões de pessoas em 184 municípios (ANA, 2019). O município de Cunha possui duas Unidades de Conservação de proteção integral, o núcleo Cunha-Indaiá do Parque Estadual da Serra do Mar e parte do Parque Nacional da Serra da Bocaina, totalizando uma área de aproximadamente 12.500 ha legalmente protegidos dentro do município. O município possui pequenas áreas de remanescentes florestais, devido ao processo de substituição da floresta nativa por pastagens e culturas anuais de subsistência familiar. Porém, atualmente estas áreas de agropecuária se encontram em elevado grau de degradação de solo, provocando deslizamentos de terra, erosão do solo, assoreamento dos rios, destruição de nascentes, e outros tipos de desastres naturais, associados principalmente à falta de políticas públicas e de investimentos de infraestrutura (BRASIL, 2005).

Segundo o IBGE, a população do município de Cunha no último censo realizado em 2010 era de 21.866 pessoas, enquanto em 2018 este número caiu para 21.639 de habitantes (IBGE, 2018). O município apresenta 52,4% de domicílios com esgotamento sanitário adequado; 43,1% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização; e 32,6% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio) (IBGE, 2018).

Em relação a áreas de riscos a desastres do município de Cunha, segundo o IBGE e CEMADEN (2018) na publicação "População em áreas de risco no Brasil", até abril de 2017 existia neste município 853 domicílios localizados em áreas de risco e habitados por 2.680 pessoas, o que equivale a 12,3% do total da sua população em 2010 que era de 21.866 habitantes.

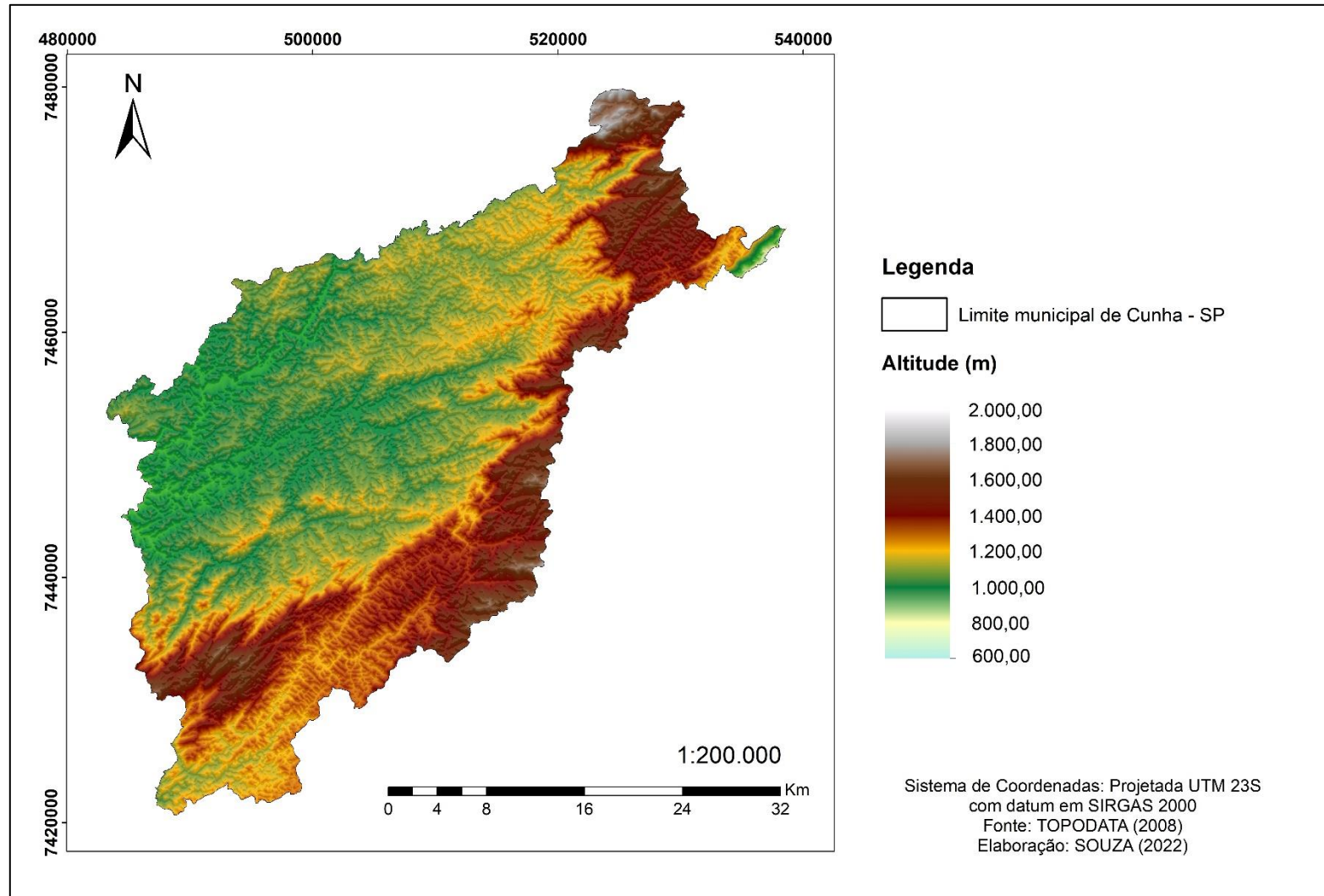
O município possui altitude média de 1.100 metros, com o cume sendo no Pico da Pedra da Macela. A hipsometria do município varia de 498,73 m a 1879,22 m, conforme Figura 6.

Figura 5 – Caracterização do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria (2022).

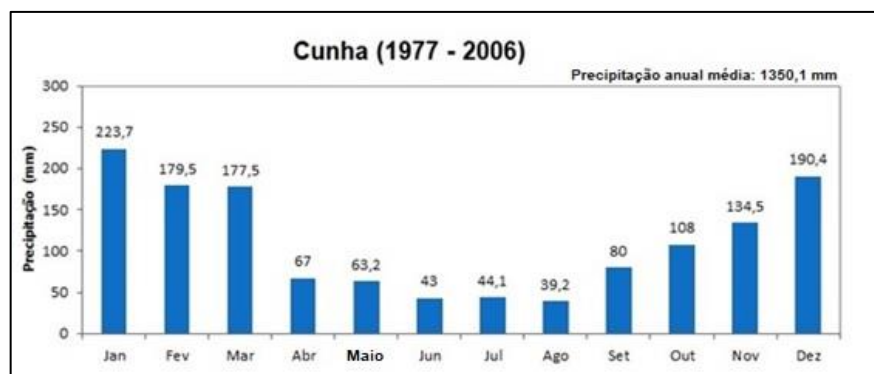
Figura 6 – Mapa hipsométrico do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria (2022).

A média anual total de chuvas no município de Cunha é de aproximadamente 1350,1 mm, levando em consideração a série histórica de 1977 a 2006, segundo dados do Serviço Geológico do Brasil - CPRM e conforme apresentado na Figura 7 (CPRM, 2016). É possível verificar que deste montante, 75% das precipitações com volume superior a 100 mm de chuva se concentram entre os meses de outubro a março, sendo janeiro o mês com maior volume (223,7 mm). Os meses de abril, maio e setembro também contam com um valor importante de precipitação, enquanto o período mais seco do ano no município se concentra entre os meses de junho a agosto, com chuvas abaixo dos 50 mm mensais. Cabe salientar que os eventos de extremo climatológico de janeiro de 2010 que culminaram em diversos deslizamentos de terra em Cunha, foram os mesmos que causaram inundações no município de São Luiz do Paraitinga (limítrofe de Cunha). Tais ocorrências se deram pela expressiva precipitação de chuvas que ocorreram no Rio Jacuí e no Rio Paraitinga, e em sua confluência, acarretando volumes hídricos críticos de extravasamento destes rios.

Figura 7 – Precipitação anual média do município de Cunha/SP entre 1977 e 2006



Fonte: CPRM (2016).

4.1.1 Pedologia

A Figura 8 apresenta os tipos de solo do município de Cunha, se referindo à variável ambiental pedologia.

Observa-se que a tipagem preponderante trata-se dos Cambissolos, com 78,45% da área municipal, representando 1.102,50 km². Os Cambissolos ocorrem disseminados em todas as regiões do Brasil, muito encontrados em regiões serranas ou montanhosas (IBGE, 2007). Estes tipos de solos são compostos por material mineral de baixo gradiente textural entre seus horizontes, sendo pouco desenvolvidos quando comparados aos Latossolos. São rasos e de elevada erodibilidade, normalmente não permitindo um uso intensivo, podendo ocorrer erosões

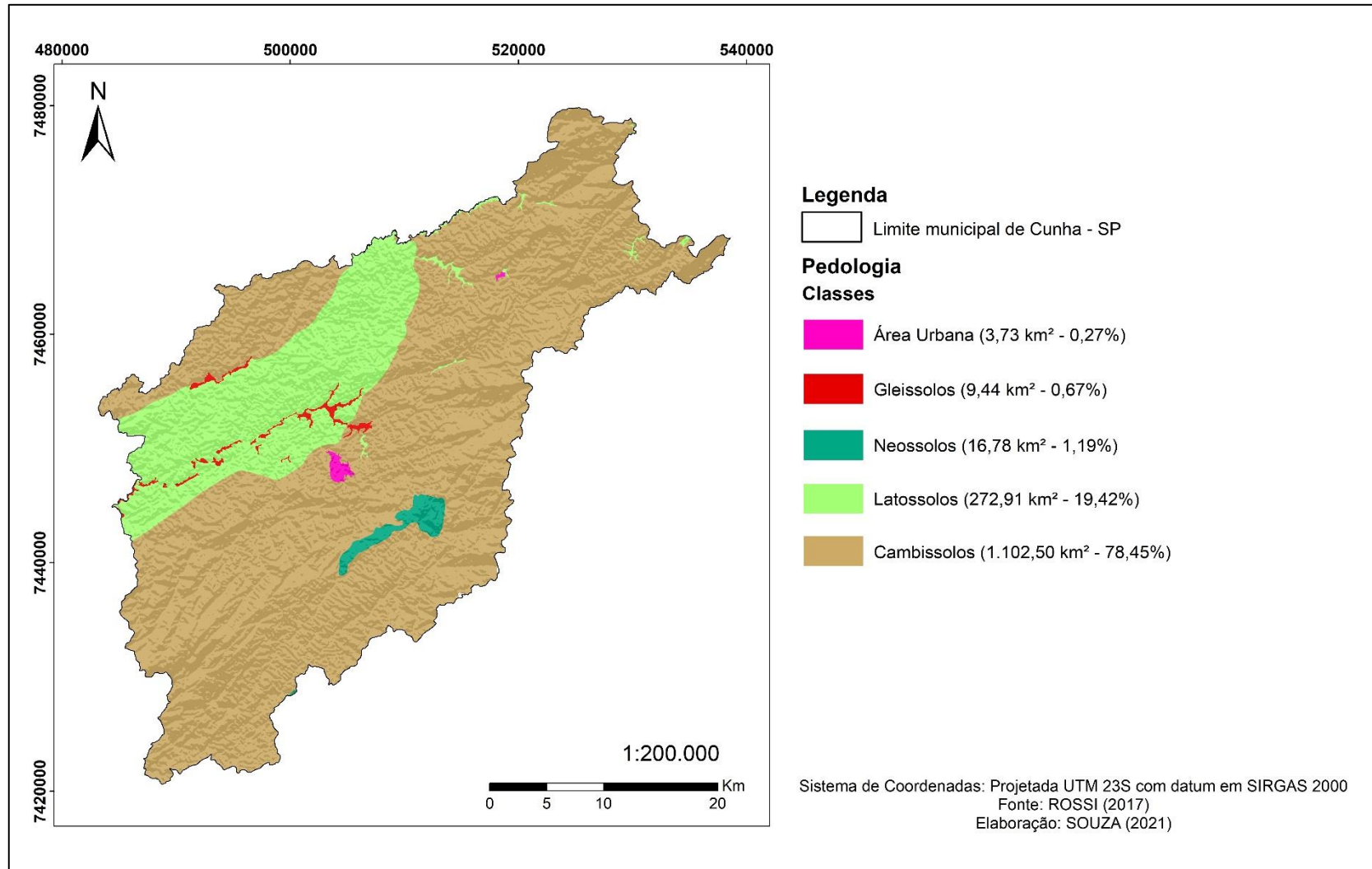
laminares até sulcos e voçorocas, expondo em um período curto seu subsolo (EMBRAPA, 2003). Desta forma, devido à sua fragilidade, estes tipos de solo são importantes na investigação de possíveis novos desastres naturais no município.

Seguidamente dos Cambissolos, a segunda classe mais importante encontrada no município é a dos Latossolos, com 19,42%, igual a 272,91 km². Os Latossolos, em geral, são solos muito intemperizados, profundos e que apresentam boa drenagem. Possuem também grande homogeneidade de características ao longo do perfil e mineralogia da fração argila predominantemente caulinítica ou caulinítica-oxídica. Distribuem-se por amplas superfícies no território brasileiro, ocorrendo em praticamente todas as regiões, e os principais aspectos que os diferenciam dizem respeito as suas colorações e diferentes teores de óxido de ferro (IBGE, 2007).

Imediatamente após os “Latosolos”, a classe com maior parcela em Cunha refere-se aos Neossolos, com 1,19%, representando 16,78 km². Os Neossolos podem apresentar alta (eutróficos) ou baixa (distróficos) saturação por bases, acidez e altos teores de alumínio e de sódio. Variam de solos rasos até profundos e de baixa a alta permeabilidade (SANTOS; ZARONI, 2006). São os solos de encostas declivosas pouco profundos (50 cm a 1 m) e bem drenados, determinando fragilidade ambiental. Como principais obstáculos ao uso, podem ser citados o relevo declivoso, pouca espessura e presença de rochas. Podem ser de baixa ou alta fertilidade e, quando ricos quimicamente, são muito utilizados para a agricultura, principalmente por agricultores que possuem pequenas áreas. Quando possuem baixa fertilidade e relevos inclinados, os solos devem ser reservados para preservação da flora e fauna (PARANÁ, 2013).

Por fim, cita-se a classe pedológica dos Gleissolos, com 0,67% da área do município de Cunha, igual a 9,44 km². Estes solos possuem textura arenosa, com predominância háplica (além de melânico), com argila de atividade baixa. Gleissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte glei. Apresentam baixa fertilidade natural, podendo também apresentar problemas com acidez e teores elevados de alumínio, de sódio (salinos) e de enxofre (tiomórficos). Com relação às características físicas, são solos mal ou muito mal drenados, em condições naturais. A proximidade com os rios limita o uso agrícola desta classe de solos, sendo, também, área indicada para preservação das matas ciliares. No entanto, áreas fora da proteção ambiental apresentam potencial ao uso agrícola, desde que não apresentem teores elevados de alumínio, sódio e de enxofre (SANTOS; ZARONI, 2006). Quanto à classificação dos Gleissolos frente a suscetibilidade em função da textura dos solos, observa-se uma relação de textura argilosa média e/ou argilosa com substratos arenosos, com suscetibilidade a deslizamentos de terra variando de baixa a média (SILVEIRA; VETTORAZZI e VALENTE, 2014).

Figura 8 – Mapa pedológico do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de Rossi (2017).

4.1.2 Litologia

No município de Cunha ocorrem, basicamente, dois grandes grupos litológicos do embasamento cristalino (rochas migmatíticas e graníticas), além de sedimentos recentes (Quaternário) (NETO, 2010). Migmatitos são a mistura de fácies de rochas metamórficas, onde pelo menos um componente é representado por material granítico. Por assim dizer, o entendimento dos zoneamentos geológico-geotécnicos são ferramentas úteis na prevenção de desastres naturais, ao passo que indicam áreas impróprias para a ocupação urbana (MONTANDON, 2017).

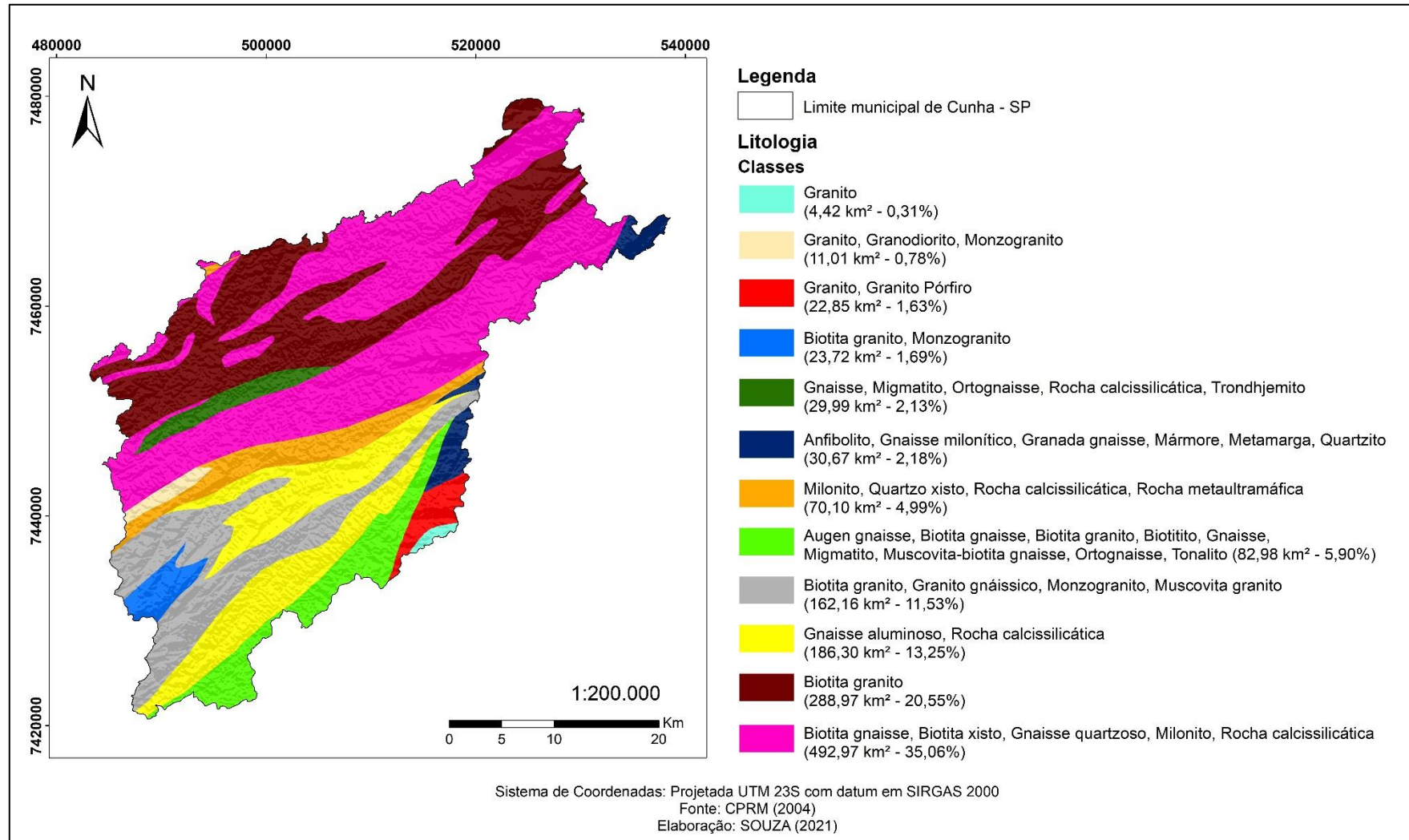
As unidades geológicas que afloram em parcelas da região de Cunha pertencem ao Terreno Embu. Essa entidade tectônica é constituída por rochas metamórficas e ígneas, em sua maioria com idades proterozoicas (SOARES, 2018). Devido essa vasta e complexa composição geológica, existem muitas classes litológicas que envolvem o município, conforme apresentado na Figura 9. Algumas características das principais rochas encontradas no município são:

A classe de Biotita gnaïsse, que representa 35,06% do município (492,97 km²), é uma rocha essencialmente formada por quartzo e feldspato em presença do mineral silicato do grupo das micas (biotita) e derivado de processos de metamorfismo de rochas ígneas e rochas sedimentares, culminando em rochas migmatíticas. O componente gnaïsse em sua composição é quem confere grande indicador de condições metamórficas em sua estrutura (MONTANDON, 2017).

Em seguida vem a Biotita granito, representando sozinha 20,55% (288,97 km²), fora as parcelas encontradas em outras estruturas geológicas. Segundo o banco de dados do Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert - MHE, os granitos são rochas plutônicas ácidas, supersaturadas, formadas principalmente por quartzo (10 - 40%), feldspato potássico (30-60%), e plagioclásio (0-35%), predominando feldspatos alcalinos. Entre os minerais secundários mais comuns na composição de rochas graníticas estão: biotita, muscovita, hornblenda, titanita, magnetita, ilmenita, apatita, zircão, entre outros (MHE, 2000).

Em relação aos gnaïsses, estes são rochas cujos componentes mineralógicos essenciais são quartzo e feldspato metamórficos, sendo formados por metamorfismo regional de rochas ígneas félsicas e rochas sedimentares. Os litotipos Tonalito gnaïsse e Granito gnaïsse representam gnaïsses de composição tonalítica e granítica, respectivamente (WINGE, 1996; MHE, 2000). Como pode ser observado na Figura 9, os gnaïsses são amplamente encontrados nas demais classes, conferindo grandes condições de metamorfismo na formação geológica do município de Cunha.

Figura 9 – Mapa litológico do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de CPRM (2004).

4.1.3 Uso e cobertura do solo

No ano de 2011 o município de Cunha era ocupado por sete (7) classes de uso e cobertura do solo. A Figura 10 apresenta a espacialização de cada classe.

A maior parcela do município consistia em formação de floresta, predominantemente nativa, do bioma da Mata Atlântica. Pela definição, uma floresta pode consistir tanto em formações florestais fechadas (densas), onde árvores de vários estratos e suprimidas cobrem uma alta proporção do solo, quanto de florestas abertas (BRASIL, 2019). Especificamente para Cunha, sua vegetação natural é composta por Floresta Ombrófila Densa e Mista Montana, abrigando as Unidades de Conservação (UC) da Serra da Bocaina, Serra do Mar, Núcleo Cunha/Indaiá, Núcleo Santa Virgínia e Serra do Mar e Paranapiacaba (CUNHA, 2018). O município na época abrangia 59,57% (837,50 km²) de cobertura vegetal.

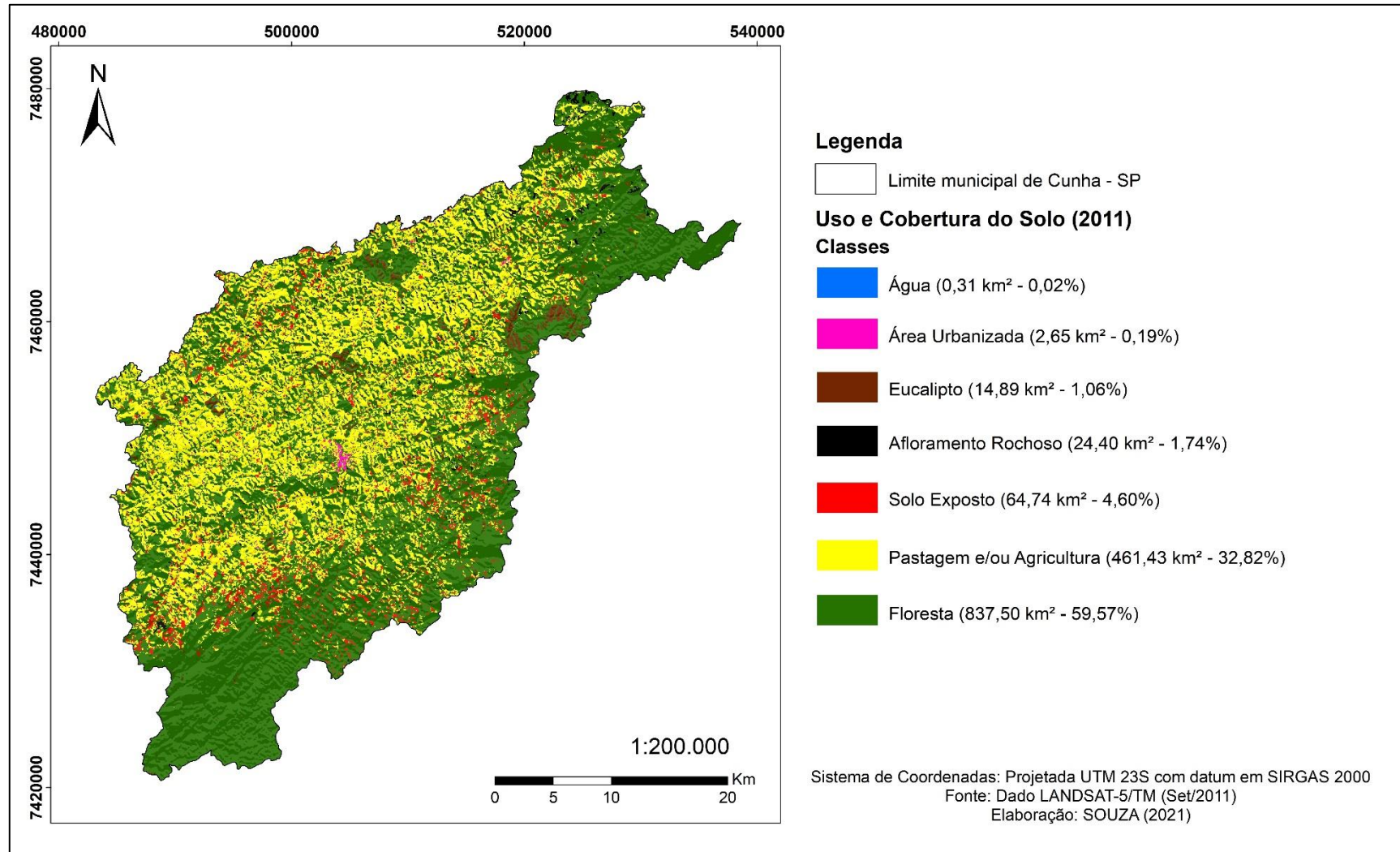
Em seguida, a segunda maior área de uso e ocupação do solo em Cunha referia-se a pastagem e/ou agricultura, com 32,81%, representando 461,43 km². Estes dados são confirmados uma vez que a economia do município de Cunha está baseada na pecuária leiteira e de corte, nas culturas de milho, feijão, batata, a produção de trutas (piscicultura) e cogumelos, (IBGE, 2018).

Por consequência, e vindo logo em seguida, tem-se a classe de solo exposto. Uma vez que as queimadas ainda são métodos muito recorrentes para pastagem e rotatividade agrícola, o município de Cunha tem apresentado aumento do desmate, inclusive em suas áreas protegidas, que são alvos de caçadores e coletores da flora da Mata Atlântica, como a extração ilegal de palmitos juçara (BRASIL, 2005).

Os afloramentos rochosos compreendem as exposições de rochas em superfície, e estão relacionadas às áreas de relevo mais movimentado. O afloramento rochoso significa o surgimento de rocha-mãe à superfície da terra após terem sido arrastados todos os materiais que a cobriam (CPRM, 2005). Em Cunha, representava 1,74% (24,40 km²).

A área de eucalipto no município tem se expandido, também substituindo a floresta nativa (representando em 2011, 1,06%, equivalente a 14,89 km² da área do município). Esta área ainda era maior que a parcela urbana de Cunha, que conta com a sua sede, e o bairro de Campos Novos de Cunha, que juntos totalizavam em torno de 2,65 km², apenas 0,19% da extensão territorial. Por fim, como já mencionado, o município de Cunha abrange importantes parcelas dos rios Paraibuna e Paraitinga, que contribuem para a formação do Rio Paraíba do Sul. Além disto, o município conta também com o Rio Jacuí. Totaliza-se no município em torno de 0,31 km² de corpos d'água, representando 0,02% de sua extensão territorial.

Figura 10 – Mapa de uso e cobertura do solo do município de Cunha/SP em 2011



Fonte: Autoria própria. Dado proveniente do satélite LANDSAT-5/TM de Set/2011 (2021).

4.1.4 Declividade

A declividade é um dos fatores ligados às condições de instabilidade de encostas. Quanto maior a declividade, maior a velocidade de deslocamento de material (LOPES; NAMIKAWA; REIS, 2011 *apud* RODRIGUES, 2013).

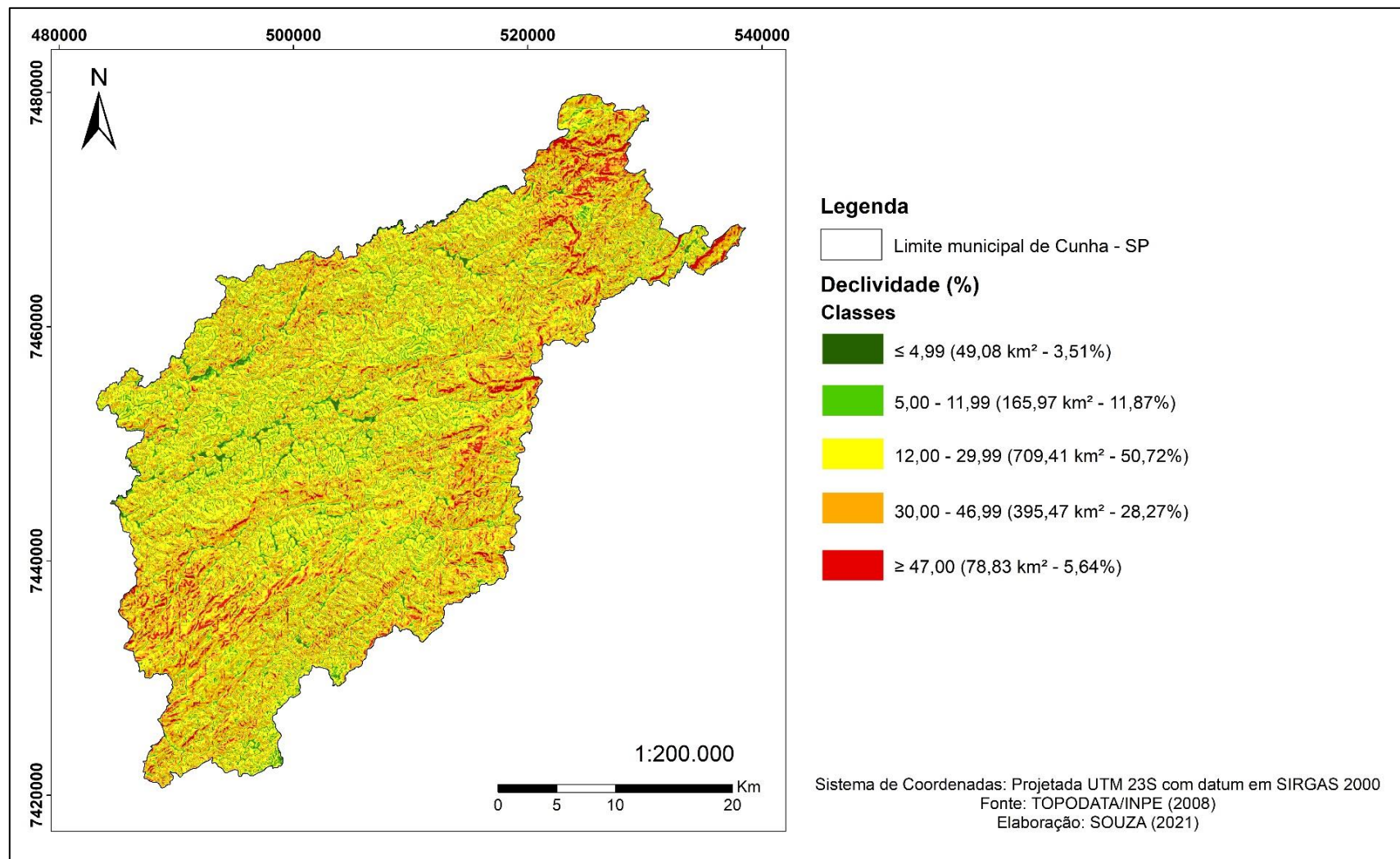
A Figura 11 refere-se a esta variável ambiental e revela que a maior parte do município se encontra na faixa de 12,00 até 30,00% de inclinação (709,41 km²), representando 50,72%, seguido de 395,47 km², com inclinação na faixa de 30,00 a 47,00% (28,27%).

Ressalta-se que a Lei Federal n° 6.766/1979 não permite a ocupação em terrenos com declividade igual ou superior a 30%, salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes (BRASIL, 1979). Já as áreas com declividade superior a 47% não devem ser ocupadas tanto em meio urbano quanto rural (PRIETO, C. C; *et al.*, 2017). Essas áreas representam no município 5,64%, ou 78,83 km², bem inferior se comparada as outras classes citadas anteriormente.

Por fim, as classes mais baixas, como a de declividade menor ou igual a 4,99%, totaliza no município 49,08 km², ou 3,51%. Já a classe entre 5,00 e 11,99% de declividade, refere-se a 165,97 km², ou 11,87% da extensão territorial de Cunha.

Desta forma, nota-se que existem moradias no município de Cunha que não obedecem a essas leis, sendo enquadradas em setores de risco e estando mais propensos a deslizamentos de terra. Além disto, segundo Gerzsenyi e Albert (2021), a incidência de deslizamentos de terra ocorre principalmente para declividades com inclinação de 7° (12% na conversão), diminuindo sua incidência a partir deste valor, sendo que para declividades maiores do que 26° (aproximadamente 47%) a incidência cai consideravelmente.

Figura 11 – Mapa de declividade do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de TOPODATA/INPE (2008).

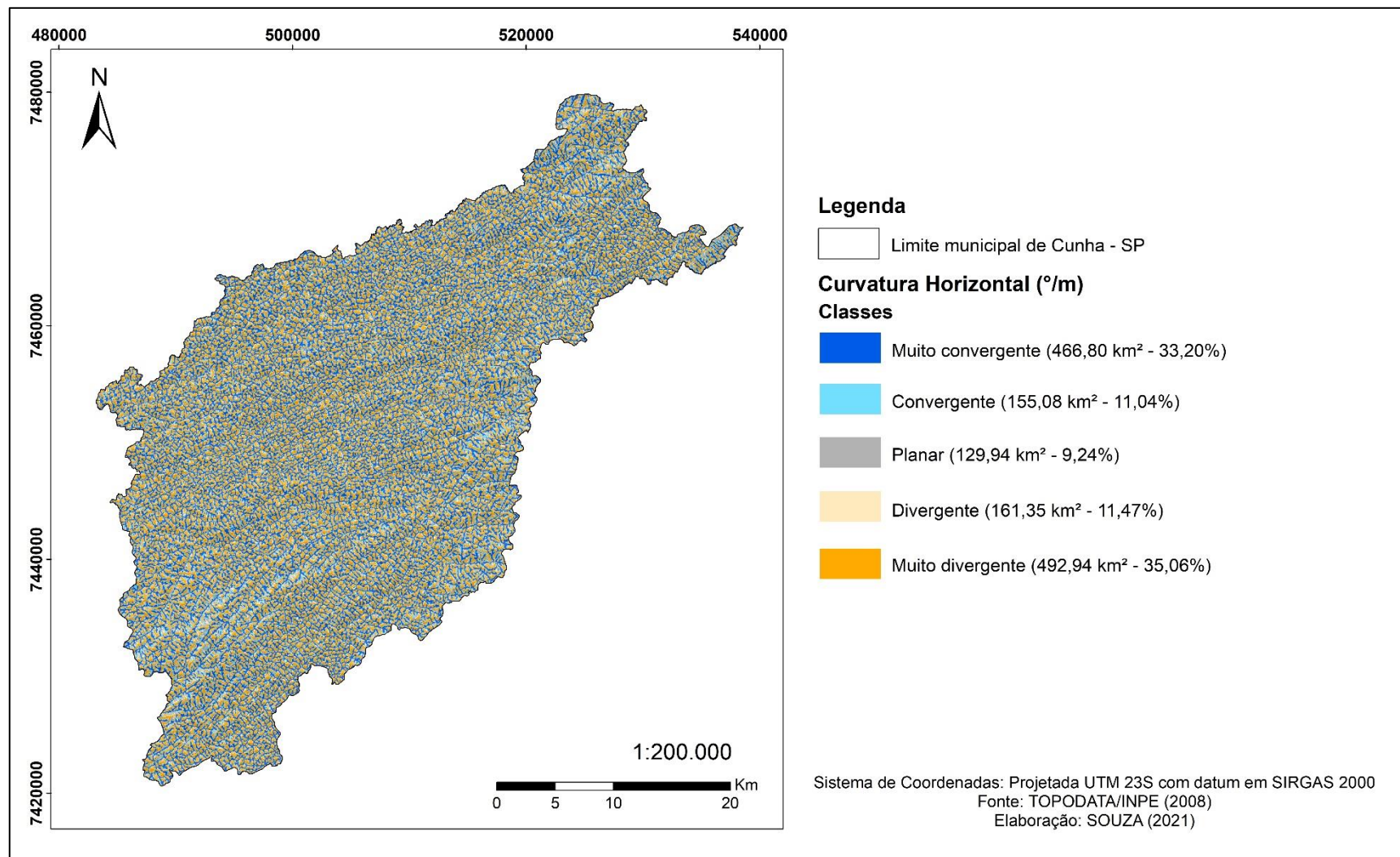
4.1.5 Curvaturas horizontal e vertical

As Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, as curvaturas horizontal e vertical de Cunha, podendo-se notar que para o município as maiores parcelas são correspondentes às classes muito divergente, com 35,06% da área total do município, e muito côncava, com 52,12%. Como medidas de concentração do escoamento superficial, as curvaturas são variáveis importantes relacionadas a problemas urbanos associados ao mapeamento de possíveis áreas de desastres naturais deflagrados por fatores hidrológicos (VALERIANO, 2008).

No que se refere à curvatura horizontal, todas as classes foram verificadas no município, e como já mencionado, a classe muito divergente contribui com o equivalente a 492,94 km². A classe que vem logo em seguida refere-se a de muito convergente, com 33,20% da extensão territorial (466,80 km²). Por fim, em ordem decrescente, as classes são: divergente, com 11,47% (161,35 km²), convergente, com 11,04% (155,08 km²) e planar, com 9,24% (129,94 km²).

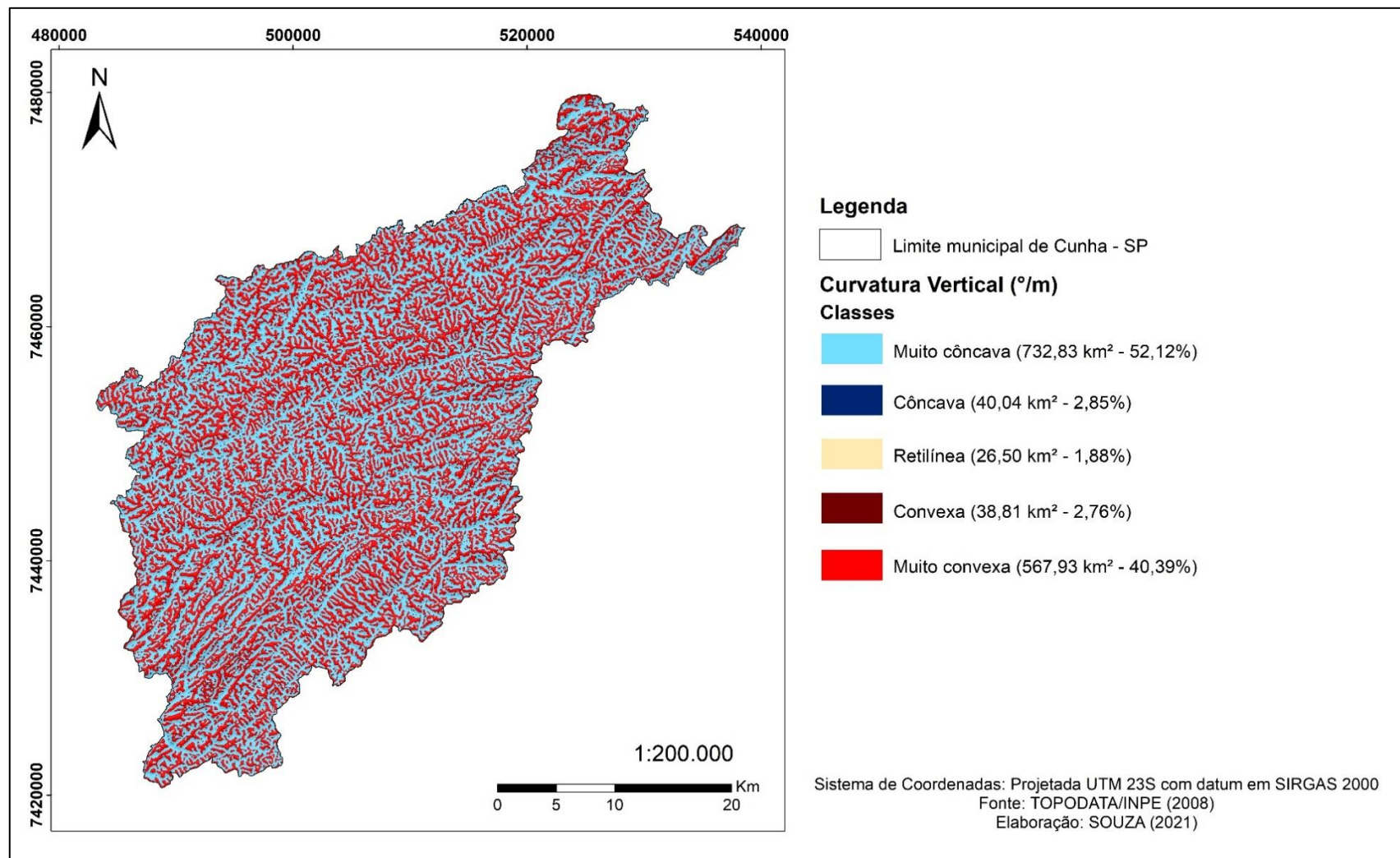
Com relação à curvatura vertical, novamente todas as classes foram verificadas no município, sendo a classe muito côncava a mais representativa, com o equivalente a 732,83 km². A classe que vem logo em seguida refere-se a muito convexa, com 40,39% da extensão territorial (567,93 km²). Por fim, em ordem decrescente, as classes são: côncava, com 2,85% (40,04 km²), convexa, com 2,76% (38,81 km²) e retilínea, com 1,88% (26,50 km²).

Figura 12 – Mapa de curvatura horizontal do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de TOPODATA/INPE (2008).

Figura 13 – Mapa de curvatura vertical do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de TOPODATA/INPE (2008).

4.1.6 Distância da malha viária

O município de Cunha é muito rico em estradas, sejam vicinais (que não possuem revestimento asfáltico, sendo geralmente de terra e utilizadas na maioria das vezes para ligação da zona rural com os municípios), sejam asfaltadas. Cunha possui a Rodovia paulista SP-171, cujas duas denominações oficiais são “Rodovia Paulo Virgílio” e “Rodovia Salvador Pacetti”, que interliga o município com Paraty, no Estado do Rio de Janeiro. Portanto, é uma rodovia com fluxo importante, sobretudo em épocas de feriados, festivais e férias. Uma vez que o município possui grande extensão territorial e muitos bairros rurais são afastados da sede urbana, diversas estradas vicinais foram construídas como vias de acesso para os eixos principais. Se somadas o comprimento de todas as estradas de Cunha, o município soma aproximadamente 1.925,00 km.

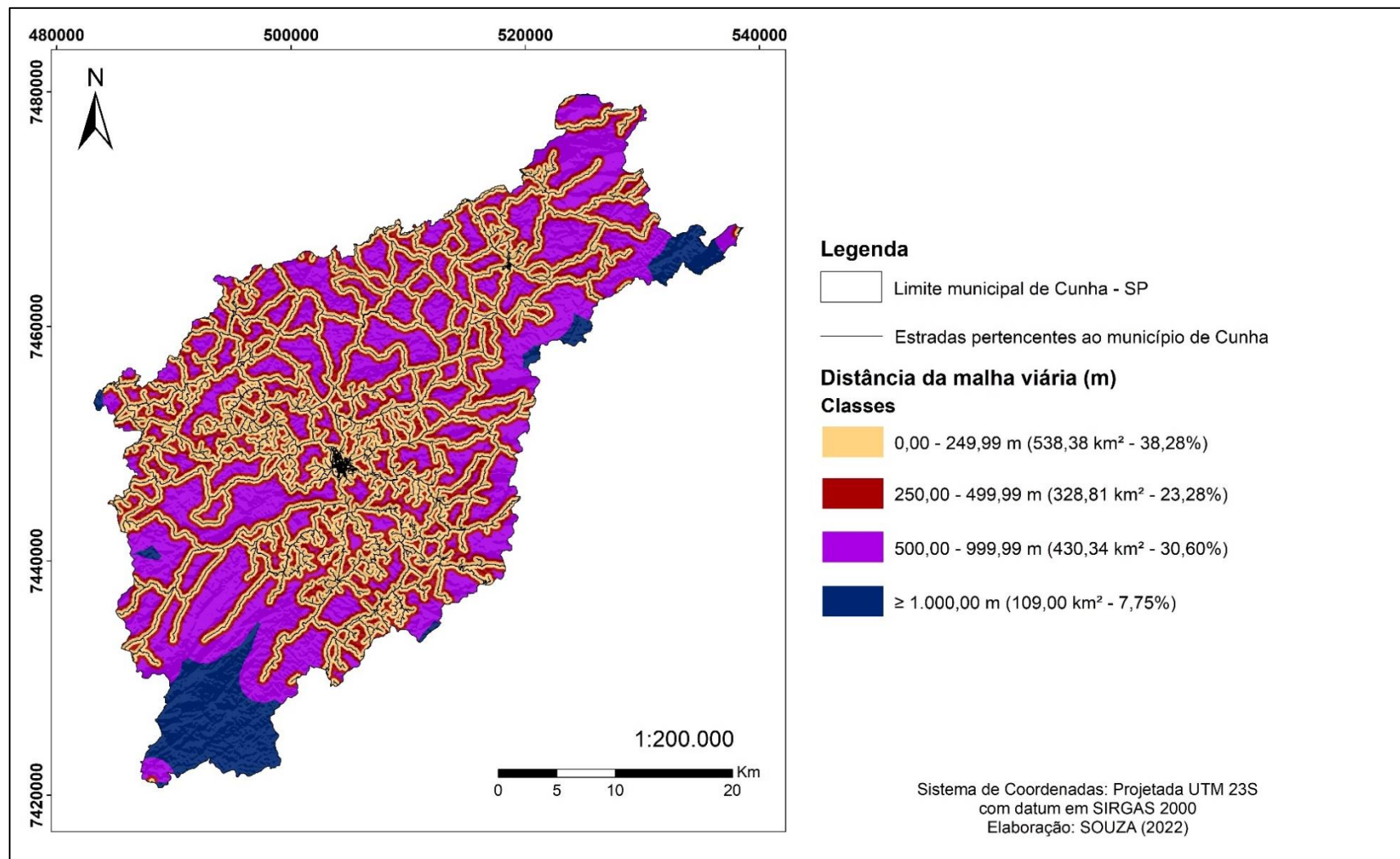
Segundo Brenning *et al.* (2015), identificou-se que deslizamentos de terra tem uma incidência maior de ocorrência em distâncias de até 150,00 m da distância das estradas. Nestas distâncias situam-se pousadas, fazendas, e comércios que se estabelecem à beira destas malhas. No evento extremo climatológico ocorrido em Cunha no dia 01/01/2010, que culminou na morte de seis (6) pessoas de uma mesma família, a residência soterrada se situava no bairro da Barra do Bié, aproximadamente a esta mesma distância de 150,00 m da malha viária.

Padronizou-se, portanto, para a espacialização da malha viária de Cunha, quatro (4) classes, variando de 0,00 a 250,00 m a partir do eixo da estrada, para a primeira classe, e com o mesmo intervalo de diferença para as próximas duas (2) classes. Devido à baixa ocupação populacional a partir de grandes afastamentos das malhas viárias, a partir de 1.000,00 m de distância das estradas estabeleceu-se uma única classe até o limite do município.

De 0,00 a 250,00 m, foram calculadas 538,38 km² de abrangência de estradas, de 250,00 a 500,00 m, 328,81 km², de 500,00 a 1.000,00 m, 430,34 km², e por fim, maior ou igual a 1.000,00 m, 109 km².

A Figura 14 apresenta o mapa da distância da malha viária respectivo do município de Cunha.

Figura 14 – Mapa de distância da malha viária do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de CPRM (2016).

4.1.7 Dados climáticos de Cunha

Tomando como base o dia do extremo climático ocorrido em Cunha (01/01/2010), que também é o dia de referência para o presente estudo, as Figuras 15, 16, 17 e 18 apresentam respectivamente os dados de:

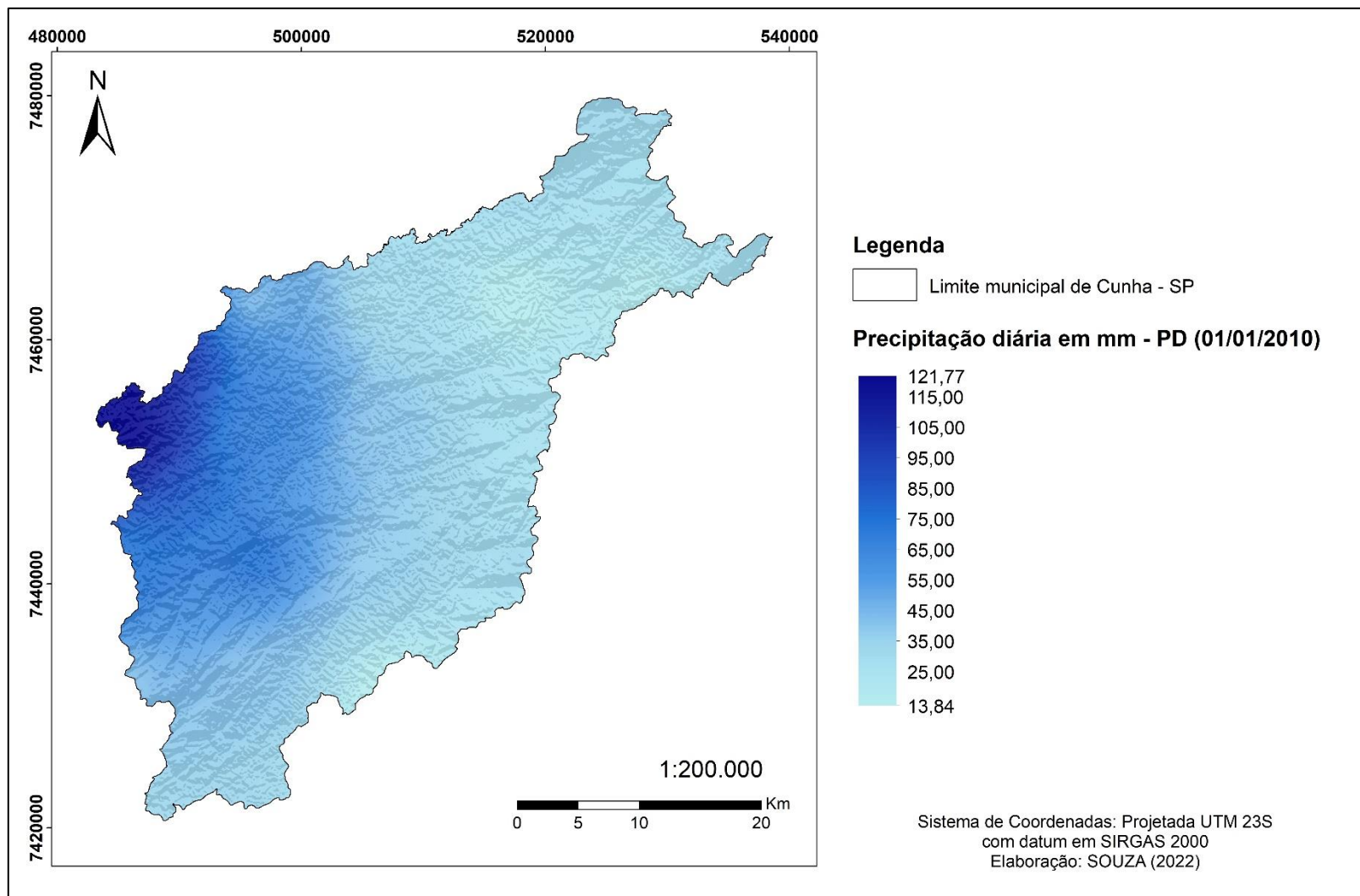
- Precipitação diária (PD): a chuva total das 24 horas do dia 01/01/2010;
- Precipitação acumulada de 5 dias (PA5): a soma da chuva ocorrida no dia 01/01/2010 acrescida da chuva dos 4 dias anteriores ao evento;
- Máxima precipitação acumulada de 5 dias (MAXPA5): máxima ocorrência de chuva em 5 dias dentro da série histórica de 01/09/2000 até 30/11/2011; e
- Coeficiente de precipitação crítica (CPC): valor que para o município de Cunha no dia 01/01/2010 foi o suficiente para desencadear deslizamentos de terra.

Em relação à “PD”, ao longo do município de Cunha teve variação de 13,84 mm até 121,77 mm, com regime mais intenso em sua porção oeste. A “PA5” variou de 74,31 mm a 240,34 mm, com volumes mais altos em toda porção oeste e sul de Cunha. A “MAXPA5” variou de 133,13 mm a 251,31 mm, com concentrações também na parcela sul e oeste do município, enquanto o “CPC”, de 15 a 115 mm, novamente se concentrando no limite oeste do município de Cunha.

Como pode ser observado, as chuvas ocorridas no dia 01/01/2010 se concentraram sobretudo na porção sul e oeste de Cunha, sendo, portanto, as áreas mais impactadas.

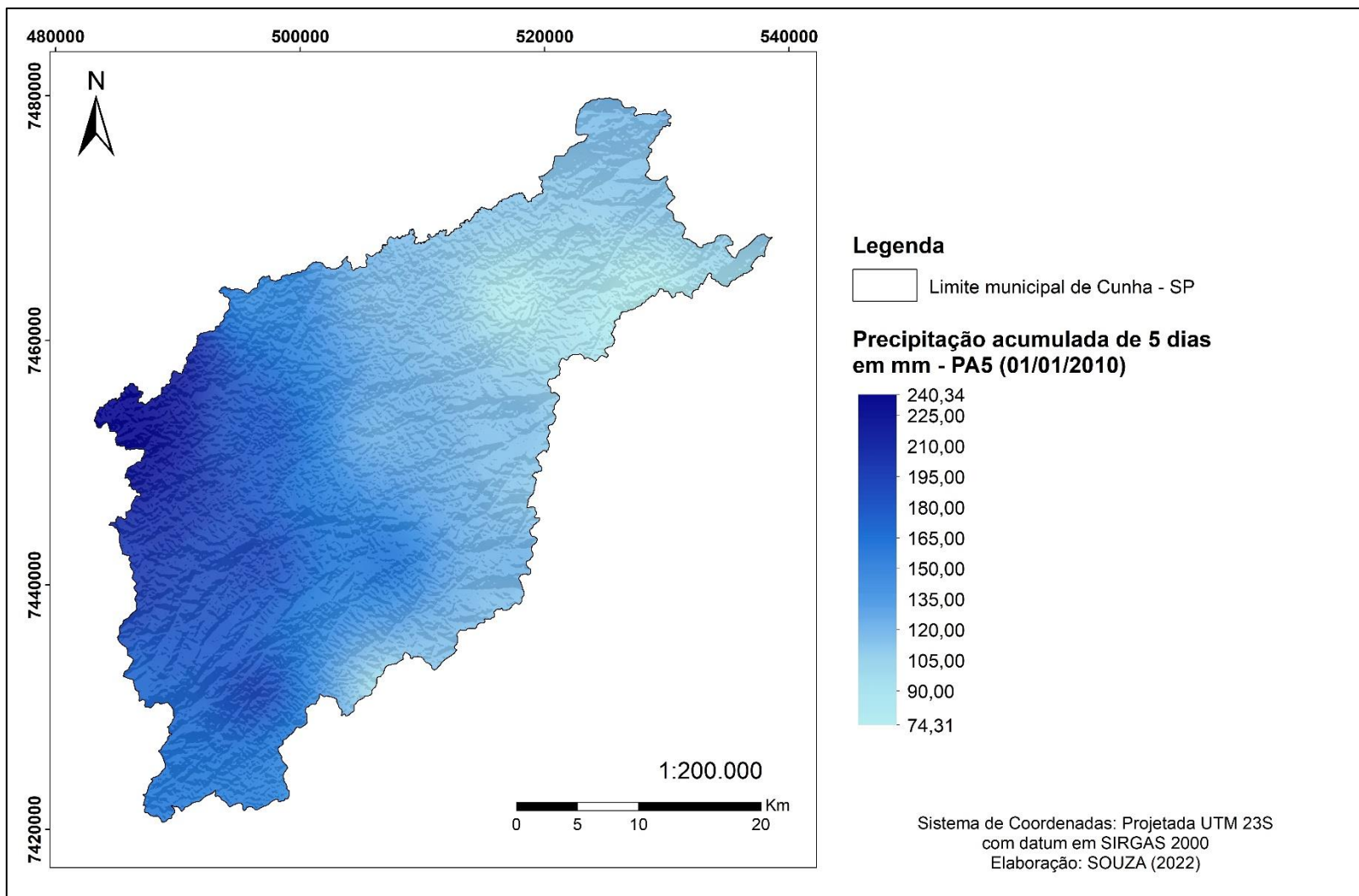
As Figuras 19, 20 e 21, por sua vez, apresentam registros de moradores locais, os impactos oriundos dos eventos ocorridos na referida data, como inundações, quedas de barreiras e pontes, que culminaram no isolamento total de bairros rurais do município.

Figura 15 – Mapa de precipitação diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



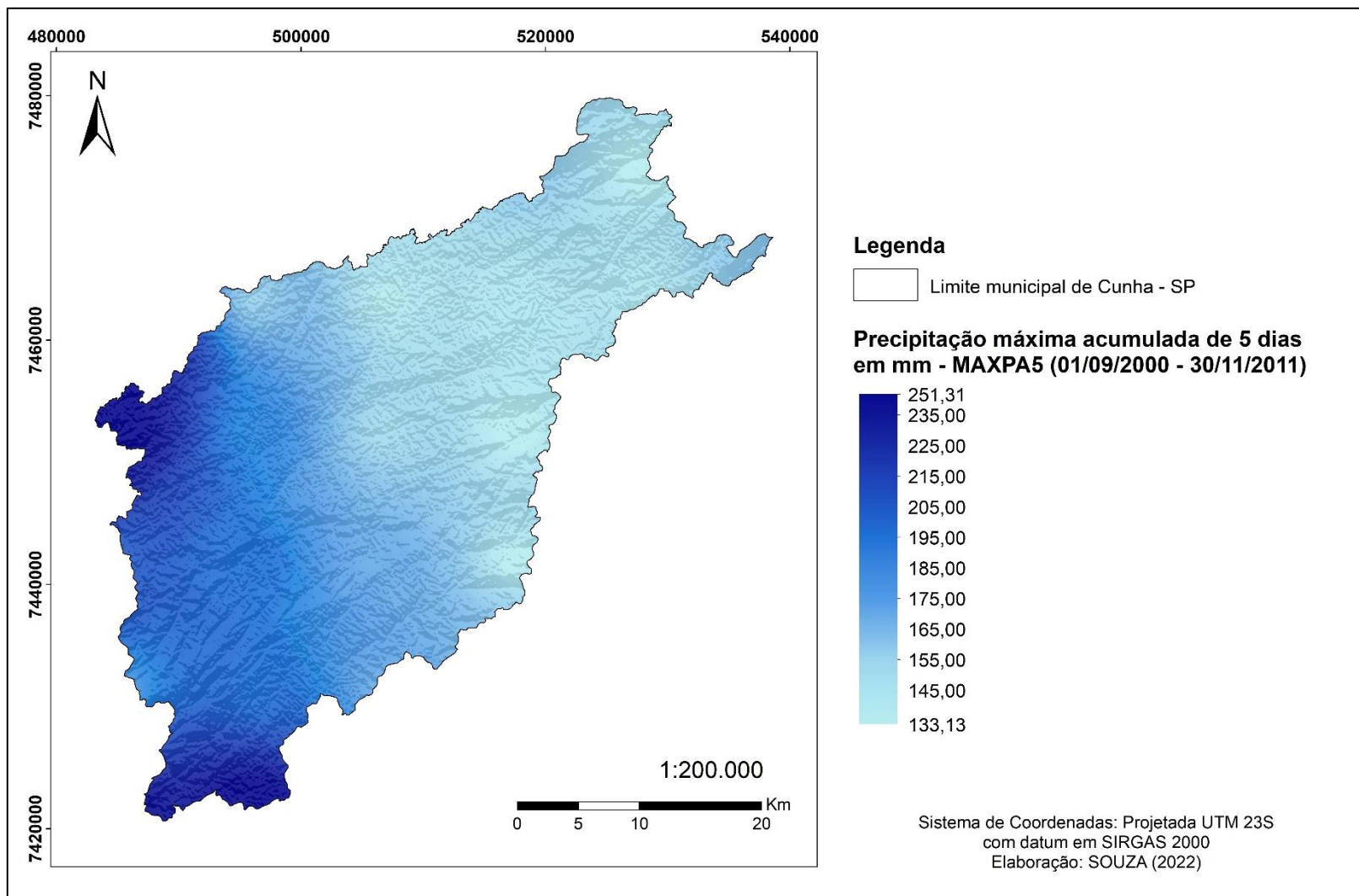
Fonte: Autoria própria. Técnica Merge, dados provenientes de INPE (2021).

Figura 16 – Mapa de precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



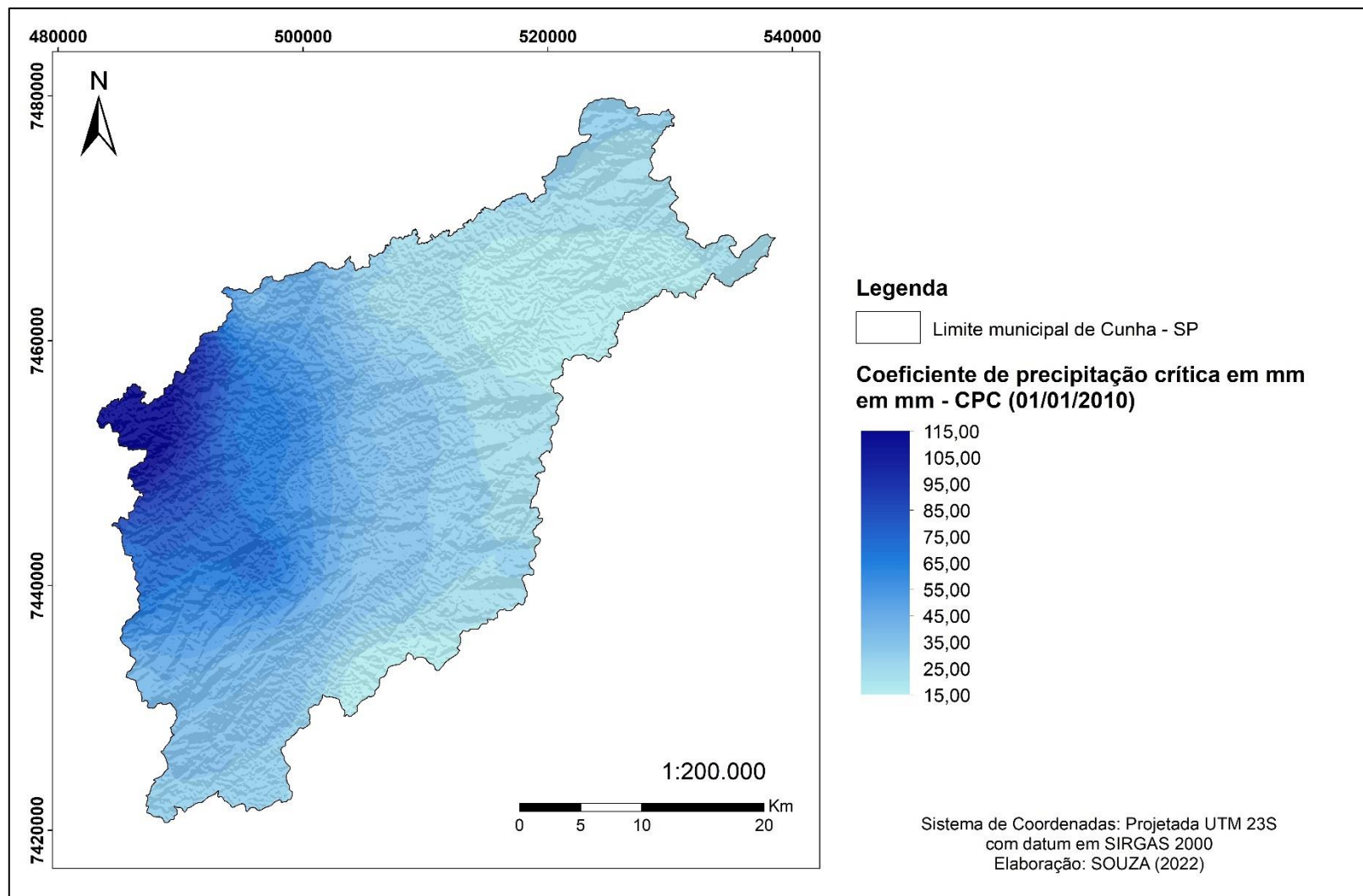
Fonte: Autoria própria. Técnica Merge, dados provenientes de INPE (2021).

Figura 17 – Mapa de máxima precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (01/09/2000 – 30/11/2011)



Fonte: Autoria própria. Técnica Merge, dados provenientes de INPE (2021).

Figura 18 – Mapa do coeficiente de precipitação crítica do município de Cunha/SP (01/01/2010)



Fonte: Autoria própria. Técnica Merge, dados provenientes de INPE (2021).

Figura 19 – Inundação de rio na estrada do Monjolo – Cunha, que encobriu estrada vicinal em decorrência dos eventos de 01/01/2010



Fonte: 4x4Brasil (2010). Estrada vicinal nos arredores da Pousada da Barra do Bié. Coordenadas aproximadas: 23° 05'49,35" S, 44°52'57,82" O.

Figura 20 – Deslizamento de terra no bairro da Barra do Bié – Cunha, que bloqueou estrada vicinal em decorrência dos eventos de 01/01/2010



Fonte: 4x4Brasil (2010). Estrada vicinal nos arredores da Pousada da Barra do Bié. Coordenadas aproximadas: 23° 10'30,88" S, 44°56'37,8" O.

Figura 21 – Restos de ponte do bairro da Barra do Bié – Cunha, devido enchente oriunda dos eventos de 01/01/2010

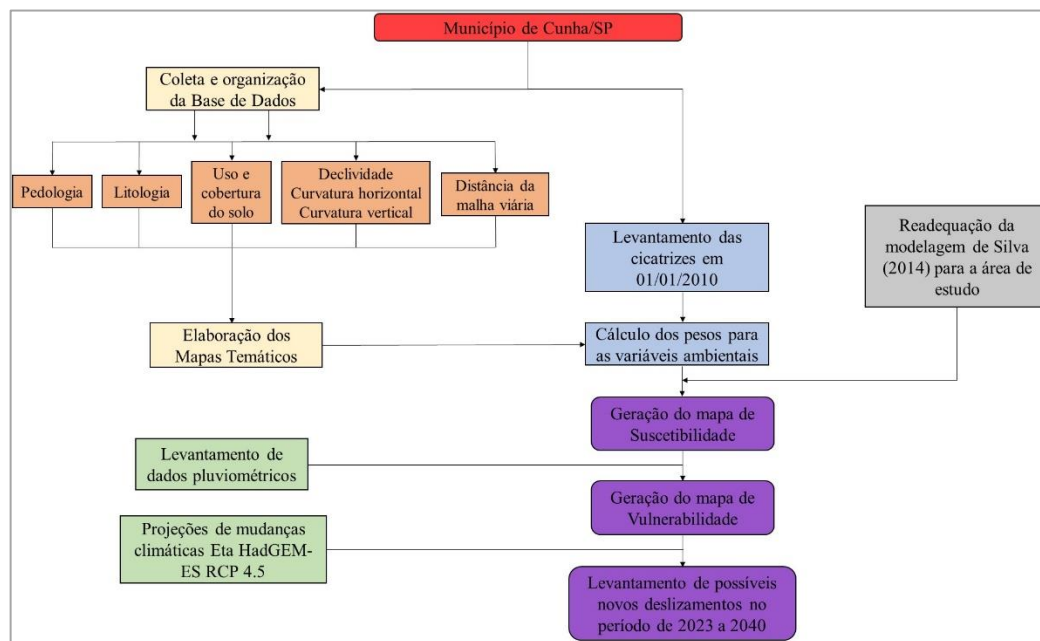


Fonte: 4x4Brasil (2010). Ponte nos arredores da Pousada da Barra do Bié. Coordenadas aproximadas: 23° 10'30,88" S, 44°56'37,8" O.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do presente estudo, diversas etapas tiveram que ser cumpridas, e serão descritas nesta seção. Apenas para rápida visualização e entendimento, a Figura 22 apresenta uma esquematização simplificada das metodologias adotadas para se atingir os objetivos propostos.

Figura 22 – Fluxograma metodológico



Fonte: Autoria própria (2022).

5.1 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS GEORREFERENCIADOS

A base de dados georreferenciados foi elaborada com o auxílio do *software* de geoprocessamento ArcGIS® 10.8. Para o município de Cunha foram coletados, extraídos e tratados nos formatos “*Shapefile*” e/ou “*Raster*” os seguintes dados:

- a – Mapa pedológico do Estado de São Paulo elaborado por Rossi (2017) na escala 1:250.000;
- b – Mapa litológico do Estado de São Paulo elaborado pela CPRM (2006) na escala 1:750.000;
- c – Imagem do satélite LANDSAT-5/TM datada de 05/09/2011 e com resolução espacial de 30,00 m que abrange todo o limite municipal de Cunha;
- d – Modelo Digital de Elevação (MDE) e dados de curvatura horizontal e vertical, com

resolução de 30 m, disponibilizados pelo projeto TOPODATA (BRASIL, 2008) do INPE;

e – Limites rodoviários de Cunha, fornecidos pela CPRM (2016); e

f – Malhas digitais dos limites municipais do Estado de São Paulo fornecidos pelo IBGE (2015).

Além disto, o *datum*/projeção de origem de cada arquivo foi reprojetoado para SIRGAS 2000/UTM 23S, sendo o mais adequado para a área de estudo.

5.2 ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS GEORREFERENCIADOS

Após ser coletada pelo banco de dados, a variável pedologia foi delimitada ao limite municipal de interesse. Essa delimitação foi realizada por meio de um recorte feito com a ferramenta “*Clip*” do ArcGIS® 10.8. O mesmo protocolo foi adotado à variável da litologia.

Os dados da variável de uso e cobertura do solo foram gerados a partir de imagem do sensor TM do satélite LANDSAT-5/TM, de 05/09/2011. A partir do uso das bandas do azul (B1), verde (B2), vermelho (B3), infravermelho próximo (B4), infravermelho médio (B5 e B7), efetuou-se o cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI. Os índices de vegetação são um dos algoritmos mais eficientes para destacar o verde da vegetação (JIMÉNEZ-LÓPEZ *et al.*, 2015). Estes índices possuem o intuito de melhor expor as características espectrais da vegetação, empregando sobretudo as regiões do visível e do infravermelho próximo e tendo como finalidade salientar o contraste espectral entre a vegetação e o solo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). A equação que demonstra o cálculo do NDVI é apresentada a seguir:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (5)$$

Onde:

NDVI = Vegetação da Diferença Normalizada;

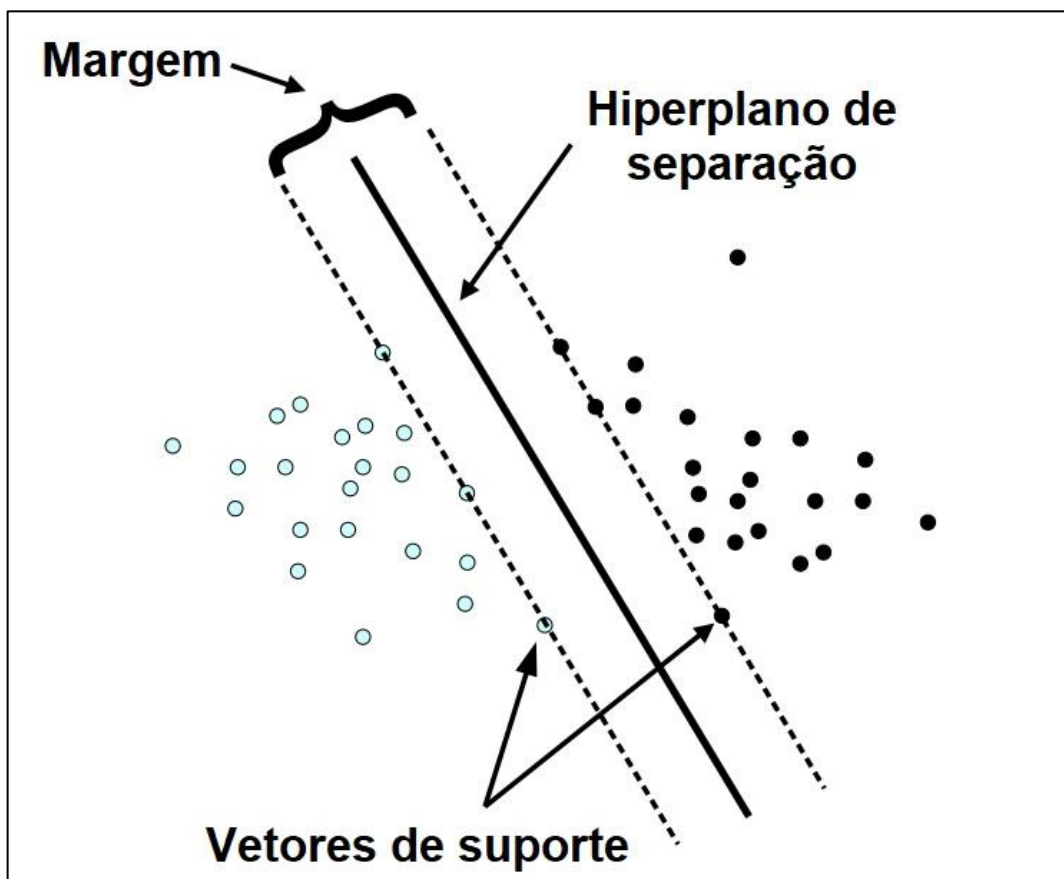
NIR = Banda espectral do infravermelho próximo; e

RED = Banda espectral do vermelho.

Posteriormente, foi realizada uma classificação supervisionada com as bandas espectrais e o índice de vegetação NDVI, onde através do algoritmo de otimização desenvolvido por

Cortes e Vapnik (1995), denominado *Support Vector Machine* - SVM, no ambiente do *software* R (R CORE TEAM, 2021), obteve-se as classes de tal variável. Tal algoritmo é um grupo de métodos de aprendizado de máquina usados para classificação e regressão, baseado no conceito de planos de decisão que definem seus limites, onde estes planos separam objetos de diferentes classes (VIDHYA, 2013 *apud* LIMA, 2014). A Figura 23 apresenta a forma como esta classificação é realizada.

Figura 23 – Representação da classificação SVM



Fonte: Meyer (2015).

Para a avaliação da variável ambiental da declividade foi necessário calcular a inclinação do terreno em função de sua distância horizontal e diferença de altitude. Isso foi realizado por meio da ferramenta “*Slope*” do ArcGIS® 10.8, uma vez que o “*Raster*” coletado pelo banco de dados TOPODATA/INPE, fornece as informações referentes a altitude.

A curvatura horizontal, também entendida como a derivada de segunda ordem das curvas de nível de uma determinada vertente (VALERIANO, 2008), foi calculada considerando as recomendações de Valeriano (2008), onde o esquema de cinco (5) classes é estabelecido com

a faixa de $\pm 0,054^\circ/\text{m}$ para terrenos planares. A reclassificação dos valores de curvatura horizontal em classes (muito convergente, convergente, planar, muito divergente e divergente) foi efetuada com a ferramenta “*Reclassify*” do ArcGIS® 10.8.

A curvatura vertical, entendida como a segunda derivada da altitude, descrita como a variação da declividade ao longo de uma determinada distância (VALERIANO, 2008), também foi calculada respeitando as recomendações de Valeriano (2008), onde o esquema de cinco (5) classes é estabelecido com a faixa de admissão $\pm 0,00125^\circ/\text{m}$ para a classe retilínea. A transformação dos valores de curvatura vertical em classes (muito côncava, côncava, retilínea, convexa e muito convexa) foi realizada através da reclassificação dos valores fornecidos, com a ferramenta “*Reclassify*”.

Para a variável da distância da malha viária, utilizou-se da ferramenta “*Euclidean Distance*” do ArcGIS® 10.8, para criação dos *buffers*, que são áreas geradas em torno de um objeto com uma distância pré-determinada.

Cabe salientar também, que tanto os dados do LANDSAT-5, quanto os do TOPODATA/INPE, fornecem dados com resolução espacial de 30 m. Assim sendo, as variáveis da pedologia, litologia e distância da malha viária foram reamostradas para essa resolução de modo a manter a regularidade das resoluções de todas as variáveis, resultando assim, em um mapa de suscetibilidade a deslizamentos de terra com a mesma resolução espacial.

Para o cálculo das áreas de cada classe de variável no ArcGIS®, a exigência de que os arquivos georreferenciados devam estar em sistemas de coordenadas projetadas foi atendida. Para o presente estudo foram utilizadas as coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) com *datum* em SIRGAS 2000.

Para os arquivos em formato “*Shapefile*” esta projeção foi efetuada através da ferramenta “*Project*”. O cálculo da área foi feito por meio da opção “*Calculate Geometry*”, acessada dentro da tabela de atributos da variável de estudo.

Para arquivos em formato “*Raster*”, utilizou-se a ferramenta de projeção “*Project Raster*” e “*Zonal Geometry as Table*” para posterior cálculo da área. Estes valores foram exportados para o Microsoft Excel® (2019) e as respectivas porcentagens calculadas.

Vale ressaltar que, para a execução da função álgebra de mapas do *software* ArcGIS® 10.8, os dados necessitam estar em formato matricial “*Raster*”. Desta forma, os valores coletados referentes às variáveis pedologia, litologia e uso e cobertura do solo sofreram uma conversão de formato, uma vez que estes são disponibilizados originalmente em formato vetorial “*Shapefile*”. Esta transformação é realizada através da ferramenta “*Polygon to Raster*”.

5.3 LEVANTAMENTO DAS CICATRIZES DE DESLIZAMENTOS DE TERRA E PESOS ADOTADOS

Para este cálculo, foram obtidos pontos de cicatrizes de deslizamentos de terra que ocorreram no município de Cunha. Após a investigação de eventos que aconteceram no município, verificou-se o registro de sucessivos desastres naturais no período de janeiro de 2010, com vítimas fatais. Portanto, como já citado, a data definida como alvo de estudo foi a de 01/01/2010.

Com base em dados georreferenciados de feições pontuais, fornecidos pela CPRM, foram registrados 343 pontos de ravinas e cicatrizes de deslizamentos de terra. Como estes pontos não apresentavam a data exata de ocorrência, eles foram confrontados com imagens do *Google Earth* mais próximas a data do evento, coletando, portanto, apenas as cicatrizes que ocorrem no período de análise. Além disto, foram também levantados outros pontos que não foram coletados pela CPRM. Essa verificação foi realizada também através do banco de imagens de satélites disponibilizados pelo *Google Earth*, estando todos os pontos dentro da data de ocorrência. Por fim, foram coletadas amostragem de 800 cicatrizes de deslizamentos de terra. A Figura 24 a seguir exemplifica a diferenciação de um evento caracterizado como ravina (a esquerda) e como cicatriz de deslizamento de terra (a direita).

Figura 24 – Diferenciação entre ravinas e cicatriz de deslizamentos de terra



Fonte: Autoria própria. Dados obtidos via *Google Earth* (2022).

A partir dos 800 pontos de cicatrizes distribuídos no município, foram calculados proporcionalmente os pesos para cada classe das variáveis, com valores variando entre “0,00” e “1,00”. Exemplificando: em caso de 400 cicatrizes ocorrerem dentro de uma determinada classe da variável uso e cobertura do solo, esta classe terá o peso de 0,50. Cabe ressaltar que em nenhuma variável a soma dos pesos das classes pode ultrapassar o valor de 1,00.

5.4 EQUAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA E MAPA TEMÁTICO

A modelagem de Silva, L. (2014) foi desenvolvida para o estudo de deslizamentos de terra ocorridos na Bacia do Rio Bengalas, em Nova Friburgo, nos desastres do dia 12/01/2011. Para a suscetibilidade do autor, foram consideradas seis (6) variáveis ambientais. Os resultados obtidos se mostraram eficientes na investigação deste tipo de movimento de massa. A Equação 6, desenvolvida por Silva, L. (2014) é descrita a seguir:

$$S = \left(\frac{\sqrt{Vdc} + \sqrt{Vpd} + \sqrt{Vli} + \sqrt{Vus} + \sqrt{Vcv} + \sqrt{Vch}}{NVA} \right) \quad (6)$$

Onde:

- S = Suscetibilidade;
- \sqrt{Vdc} = Raiz quadrada da variável declividade;
- \sqrt{Vpd} = Raiz quadrada da variável pedologia;
- \sqrt{Vli} = Raiz quadrada da variável litologia;
- \sqrt{Vus} = Raiz quadrada da variável uso e cobertura do solo;
- \sqrt{Vcv} = Raiz quadrada da variável curvatura vertical;
- \sqrt{Vch} = Raiz quadrada da variável curvatura horizontal; e
- NVA = Número de variáveis (6).

Entretanto, para a área de estudo deste presente estudo, identificou-se que ponderações deveriam ser feitas. A principal foi o incremento da variável distância da malha viária, devido sua importante contribuição para o município, conforme já descrito na seção 4.1.6. Além disto, verificou-se também a necessidade de correção dos pesos para cada variável, uma vez que as mesmas possuem papéis e níveis de intensidade diferentes na atuação e desencadeamento de deslizamentos de terra em Cunha. Ao final, a presente modelagem para a suscetibilidade contou com sete (7) variáveis ao todo.

Portanto, para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos, as variáveis adotadas foram comparadas em uma matriz par a par, de acordo com a metodologia AHP, gerando-se um peso de 0,00 a 1,00 para cada uma, ponderando a influência dessas condicionantes para a ocorrência destes eventos. Os valores de entrada da matriz par a par variaram de 1,00 a 9,00 para os condicionantes e suas classes de variáveis, onde pesos maiores indicaram maior tendência da classe à ocorrência de deslizamentos.

Desta maneira, a equação final para a suscetibilidade a deslizamentos de terra par ao município de Cunha ficou conforme apresentado na Equação 7:

$$S = \sqrt{(0,34 DMV + 0,27 DEC + 0,19 PED + 0,11 CH + 0,05 UCS + 0,02 CV + 0,02 LIT)} \quad (7)$$

Onde:

- S = Suscetibilidade a deslizamentos de terra;
- DMV = Distância da malha viária;
- DEC = Declividade;
- PED = Pedologia;
- CH = Curvatura horizontal;
- UCS = Uso e cobertura do solo;
- CV = Curvatura vertical; e
- LIT = Litologia.

Após a atribuição dos respectivos pesos para cada classe de variável, a Equação 6 foi introduzida no *input* da ferramenta “*Raster Calculator*” responsável pela execução da função de álgebra de mapas, no ArcGIS® 10.8.

Após a geração dos índices finais, estes foram reclassificados através da ferramenta “*Reclassify*” de acordo com as classes apresentadas na Tabela 6 e obtido o mapa temático final.

Tabela 6 – Classificação dos índices de suscetibilidade a deslizamentos de terra

Valores	Classes
0,00 – 0,19	Muito Baixa
0,20 – 0,39	Baixa
0,40 – 0,59	Média
0,60 – 0,69	Alta
≥ 0,70	Muito Alta

Fonte: Autoria própria. Dados provenientes de Silva, L. (2014) e adaptados pelo Autor.

Por fim, foram plotadas as 800 cicatrizes de deslizamentos de terra identificadas e através da ferramenta “*Extract by values*”, também do ArcGIS® 10.8, levantou-se os valores de suscetibilidade para cada ponto de cicatriz, calculando-se também a média aritmética simples de suscetibilidade, índice esse denominado de Índice Médio Geral de Suscetibilidade (IMGS).

5.5 MAPAS TEMÁTICOS DA PRECIPITAÇÃO

Para elaboração dos mapas de PD, PA5, MAXPA5 e CPC (Figuras 15 a 18, respectivamente), foram obtidos dados de precipitação através da técnica denominada MERGE. O produto MERGE (ROZANTE *et al.*, 2010) consiste em combinar a precipitação observada com estimativa de precipitação por satélite, sendo gerado e disponibilizado operacionalmente pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE. Esta combinação de dados de satélite com pluviômetros para a região da América do Sul é baseada em estimativas de chuva do satélite TRMM e nos dados observados em 1500 estações reportadas pelo *Global Telecommunication System* (GTS), pelas plataformas de coletas de dados (PCD's) e centros regionais do Brasil, gerando dados de precipitação de forma especializada (ROZANTE *et al.*, 2010).

Ainda de acordo com Rozante *et al.* (2010), o produto MERGE foi criado com o intuito de minimizar os problemas que ocorrem nas interpolações (regiões com baixa densidade de observações) e as deficiências (subestimativas/superestimativas) dos produtos do TRMM, propondo uma combinação de dados que permita obter campos de precipitação “observada” em grade regular com maior qualidade, sendo que o método de interpolação utilizado é a análise objetiva de Barnes (BARNES, 1973).

Seus dados são disponibilizados com resolução temporal de 30 minutos e resolução horizontal de 0,1° graus. Em termos de coordenadas projetadas, os dados são fornecidos em pontos de grade de dimensão 10 x 10 km.

Com a obtenção dos dados referentes aos dias de interesse, iniciando em 01/09/2000, o passo realizado foi o de tornar estes dados mais representativos em termos de resolução espacial, a fim de interpretar as regiões de maior concentração dentro do limite de Cunha. Para tanto, empregou-se a ferramenta “IDW” disponível no ArcGIS® 10.8.

O “IDW” (*Inverse Distance Weighted*), pesa pontos durante a interpolação de acordo como a influência de um ponto relativo a outro declina com a distância a partir de um ponto desconhecido que o usuário quer criar. A ponderação é atribuída a pontos amostrais através da utilização de um coeficiente que controla como a influência da ponderação irá diminuir à medida que a distância a partir do ponto desconhecido aumenta. Quanto maior for o coeficiente de ponderação, sobre menos pontos terá efeito. Aumentando o coeficiente, o valor do ponto desconhecido será mais próximo ao valor dos pontos vizinhos observados (QGIS, 2016).

Desta forma, a fim de manter a resolução das demais variáveis, a malha de pontos adotada para a aplicação do “IDW” foi de 30 metros, interpolando os valores entre esses pontos

de grade. A delimitação para a área de estudo foi realizada por meio do recorte feito com a ferramenta “*Clip*” do ArcGIS® 10.8.

5.5.1 Equação da vulnerabilidade a deslizamentos de terra e mapa temático

Com a obtenção dos dados de precipitação, conforme descrito na seção 5.5, por fim, calculou-se a vulnerabilidade a deslizamentos de terra. Uma vez que para a suscetibilidade a equação foi adaptada para melhor condizer com Cunha, para a vulnerabilidade, por sua vez, os parâmetros adotados nos cálculos são os mesmos que citados na literatura, portanto, não havendo necessidade de ajustes. Deste modo, uma vez com todas as variáveis já previamente obtidas, adotou-se então para o cálculo da vulnerabilidade a deslizamentos de terra, a metodologia desenvolvida por Silva, L. (2014) e apresentada conforme equação a seguir:

$$V = \frac{\overbrace{S}^{\text{1º Termo}} + \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{PD}{CPC} \right) + \left(\frac{PA5}{MAXPA5} \right)}{2} \right]}}{2} \quad \left. \vphantom{\frac{S + \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{PD}{CPC} \right) + \left(\frac{PA5}{MAXPA5} \right)}{2} \right]}}{2}} \right\} \text{2º Termo} \quad (7)$$

Onde:

S = Suscetibilidade a deslizamentos de terra;

V = Vulnerabilidade a deslizamentos de terra;

PD = Precipitação diária;

CPC = Coeficiente de precipitação crítica;

PA5 = Precipitação acumulada de 5 dias; e

MAXPA5 = Máxima precipitação acumulada de 5 dias (01/09/2000 – 30/11/2011).

A Equação 7 foi introduzida no *input* da ferramenta “*Raster Calculator*” responsável pela execução da função de álgebra de mapas, no ArcGIS® 10.8.

Após a geração dos índices finais, os mesmos foram reclassificados, através da ferramenta “*Reclassify*” de acordo com as classes apresentadas na Tabela 7 e o mapa temático final foi gerado.

Tabela 7 – Classificação dos índices de vulnerabilidade a deslizamentos de terra

Valores	Classes
0,00 – 0,19	Muito Baixa
0,20 – 0,39	Baixa
0,40 – 0,59	Média
0,60 – 0,69	Alta
$\geq 0,70$	Muito Alta

Fonte: A autoria própria. Dados provenientes de Silva (2014) e adaptados pelo Autor.

Por fim, foram plotadas as 800 cicatrizes de deslizamentos de terra identificadas e através da ferramenta “*Extract by values*”, também do ArcGIS® 10.8, levantou-se os valores de vulnerabilidade para cada ponto de cicatriz.

5.6 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS ETA HADGEM-ES RCP 4.5 E NOVOS EVENTOS ENTRE 2023 E 2040

Foram projetados os valores de precipitação para o período de 01/01/2023 a 30/12/2040 através do modelo regional de mudanças climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5 (CHOU *et al.*, 2014). Os valores advindos dessa simulação representaram os novos valores de precipitação que foram novamente utilizados no 2º termo matemático da Equação 7.

O modelo climático Eta HadGEM-ES possui resolução espacial de 20 km na horizontal, abrangendo 38 camadas na vertical. Devido à disposição das malhas de dados, a precipitação diária para o município foi considerada como distribuída igualmente em toda sua extensão. Além disto, o valor de CPC adotado foi o mínimo dentre o intervalo estabelecido (com variação de 10,00 mm), uma vez que o valor mínimo foi identificado como já sendo o suficiente para deflagrar deslizamentos de terra em algumas áreas de Cunha. Calculou-se também a PA5 dentre o intervalo de anos de interesse, verificando qual o mínimo valor para ocorrer deslizamentos de terra, sendo, portanto, este valor fixado. Por fim, extraiu-se também o valor de MAXPA5.

Com isso, coletou-se as informações para o período entre 2023 e 2040 onde a PA5 ultrapassou o limiar de deslizamentos, e com o maior valor de suscetibilidade calculou-se a vulnerabilidade novamente, a partir da Equação 7. O cálculo foi realizado através de planilha em Microsoft Excel® (2019), com os dados obtidos das projeções e os extraídos do ArcGIS®.

Segundo Silva, L. (2014), para que ocorra um de deslizamento de terra, o resultado da vulnerabilidade deve ser maior ou igual a 0,70. Assim, as datas que resultaram nestes valores, foram contadas como dias passíveis de novos eventos extremos e de deslizamentos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo. Esta seção será dividida em cinco (5) tópicos, onde no primeiro serão apresentados os resultados matemáticos obtidos para a confecção do mapa de uso e cobertura do solo; no segundo serão discutidos os pesos dados às variáveis ambientais e o levantamento do número de cicatrizes em cada classe das variáveis; no terceiro tópico o mapa final de suscetibilidade a deslizamentos de terra; seguidamente o mapa final de vulnerabilidade a deslizamentos de terra; e por fim, o número possível de novos eventos extremos e de deslizamentos para o período de 2023 a 2040.

6.1 RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA VARIÁVEL AMBIENTAL USO E COBERTURA DO SOLO

Como já citado, para a confecção do mapa da variável ambiental uso e cobertura do solo, foi realizada uma classificação supervisionada pelo algoritmo *Support Vector Machine* - SVM, no *software* R. Para a realização deste algoritmo é necessário coletar amostras que sirvam como referência para a correlação das classes pertencentes ao modelo estudado. No presente estudo, foram coletadas 100 amostras (polígonos) dentre as sete (7) variáveis ambientais, sendo que o algoritmo normalmente as separa em amostras de treinamento ($\cong 70\%$), e de validação ($\cong 30\%$).

Feito isto, um dos resultados deste algoritmo é a matriz de confusão, que indica uma visão tabulada da acurácia do mapa de classificação e permite o cálculo de medidas, tais como a acurácia global, acurácia do usuário e acurácia do produtor (CONGALTON, 1991). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para a matriz de confusão do uso e cobertura do solo de Cunha.

Tabela 8 – Matriz de Confusão para a variável uso e cobertura do solo do município de Cunha para 2011

Classes		Referência						
		Afloramento Rochoso	Água	Eucalipto	Floresta	Pastagem e/ou Agricultura	Solo Exposto	Área Construída
Classificado	Afloramento Rochoso	16	0	0	0	0	8	0
	Água	0	8	0	0	0	0	0
	Eucalipto	0	0	143	2	0	0	0
	Floresta	0	1	4	947	0	0	0
	Pastagem e/ou Agricultura	0	0	0	0	393	1	0
	Solo Exposto	0	0	0	0	0	48	0
	Área Construída	0	0	0	0	1	0	19

Fonte: Autoria própria (2022).

A avaliação do SVM resultou em uma acurácia global de 98,93%, que é o resultado da soma do número de pixels que foram classificados corretamente, dividido pelo número total de pixels.

O coeficiente Kappa é uma medida de concordância, bastante utilizada na literatura como forma de medir o desempenho em relação à quantidade de casos corretamente avaliados (COHEN, 1960 *apud* MOURA, 2016). O Índice Kappa, é associado à qualidade da classificação, variando de 0,00 (péssimo) a 1,00 (excelente) (LANDIS; KOCH, 2017). Desta maneira, o valor obtido para o presente estudo foi de 98,13%, revelando excelente resultado.

A acurácia do produtor (AP) indica a probabilidade de um pixel de referência ter sido corretamente classificado. A acurácia do usuário (AU), por sua vez, calcula a probabilidade de um pixel classificado no mapa representar de fato essa classe em campo (CONGALTON, 1991).

As Tabelas 9 e 10 indicam tais valores para cada variável ambiental.

Tabela 9 - Acurácia do Produtor (AP) para as classes de UCS de Cunha no ano de 2011

	Afloramento Rochoso	Água	Eucalipto	Floresta	Pastagem e/ou Agricultura	Solo Exposto	Área Construída
AP	93,75	88,89	100,00	100,00	100,00	98,25	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 10 - Acurácia do Usuário (AU) para as classes de UCS de Cunha no ano de 2011

	Afloramento Rochoso	Água	Eucalipto	Floresta	Pastagem e/ou Agricultura	Solo Exposto	Área Construída
AU	93,75	100,00	100,00	100,00	99,75	98,25	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme já mencionado, partir da matriz de confusão realizada para a variável de uso e cobertura do solo, foi possível mensurar a qualidade da classificação, em outras palavras, o quão confiáveis são as representações realizadas na classificação (COHEN, 1960). A Acurácia do Produtor (AP) revelou que 100% dos pixels de referência das classes de eucalipto, floresta, pastagem e/ou agricultura e área urbana foram corretamente classificados. Em relação à Acurácia do Usuário (AU) há 100% de confirmação que os dados de água, eucalipto, floresta e área urbana sejam validados em campo. É importante salientar, que embora os índices tenham revelado a assertividade nos dados coletados, a escolha da amostragem é a etapa essencial, uma

vez que o algoritmo irá validar os resultados a partir dos dados de referência, devendo, portanto, escolher amostras que se tenha certeza da real classe a que pertencem.

6.2 IDENTIFICAÇÃO DO NÚMERO DE CICATRIZES E SEUS PESOS PARA CADA VARIÁVEL

Diante do exposto nas seções 5.3 e 5.4, as 800 cicatrizes foram levantadas para a data de 01/01/2010 e em cima de cada variável referente a suscetibilidade a deslizamentos de terra, foram identificadas o número de cicatrizes pertencente a cada classe. A partir disto, foram calculados proporcionalmente os pesos para cada classe de cada variável, com a obrigação da soma de todas as classes para cada variável não ultrapassar 1,00.

6.2.1 Pedologia

A Tabela 11 apresenta os pesos referentes a variável da pedologia.

Tabela 11 – Cicatrizes e pesos para a variável pedologia do município de Cunha

Pedologia		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Área Urbana	5	0,01
Cambissolos	685	0,85
Gleissolos	0	0,00
Latossolos	69	0,09
Neossolos	41	0,05
Total	800	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Observa-se que a tipagem preponderante trata-se dos Cambissolos, com a ocorrência de 685 cicatrizes de deslizamentos de terra. Como já citado anteriormente, além deste tipo de solo ser tipicamente encontrado nas regiões serranas brasileiras, cobrindo neste caso quase todo o município de Cunha, são solos pouco desenvolvidos e com alta suscetibilidade à ação de atividades de intemperismo, caracterizando, portanto, o alto índice de deslizamentos de terra ocorridos nesta classe. Ressalta-se também que um dos motivos pelos quais houve a necessidade de readequação dos pesos para cada variável (também já explicitado na seção 5.4), foi pelo fato da variável pedologia, sobretudo a classe Cambissolos ter um peso muito maior frente as demais classes e variáveis, sobrepondo-as e camuflando os resultados.

As demais variáveis apresentaram valores não tão relevantes quanto aos Cambissolos para a modelagem. Cabe salientar que devido ao alto grau de urbanização na sede urbana, poucos pontos de cicatrizes foram identificados. Nas regiões mais ruralizadas a percepção e magnitude dos eventos puderam ser mais bem observadas e exploradas.

6.2.2 Litologia

A Tabela 12 apresenta os resultados contabilizados das cicatrizes para a variável litologia.

Tabela 12 – Cicatrizes e pesos para a variável litologia do município de Cunha

Litologia		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Biotita granito	140	0,18
Granito, Granito pórfiro	0	0,00
Gnaiss, Migmatito, Ortognaiss, Rocha calcissilicática, Trondhjemito	6	0,01
Gnaiss aluminoso, Rocha calcissilicática	104	0,13
Milonito, Quartzito, Rocha calcissilicática, Rocha metaultramáfica	111	0,14
Biotita gnaiss, Biotita xisto, Gnaiss quartzoso, Milonito, Rocha calcissilicática	209	0,26
Granito	2	0,00
Anfibolito, Gnaiss milonítico, Granada gnaiss, Mármore, Metamarga, Quartzito	0	0,00
Augen gnaiss, Biotita gnaiss, Biotita granito, Biotitito, Gnaiss, Migmatito, Muscovita-biotita gnaiss, Ortognaiss, Tonalito	18	0,02
Biotita granito, Monzogranito	19	0,02
Biotita granito, Granito gnáissico, Monzogranito, Muscovita granito	185	0,23
Granito, Granodiorito, Monzogranito	6	0,01
Total	800	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Como pode ser observado, as classes que tiveram identificadas maiores quantidades de cicatrizes dizem respeito às rochas metamórficas. A biotita é a maior representante dentre essas classes, justamente uma das características que confere o grau de metamorfismo. Segundo as ponderações de Crepani *et al.* (2001) e Canavesi *et al.* (2013) para a avaliação da suscetibilidade dos diferentes tipos de rocha, foram identificadas que as rochas ígneas são as menos suscetíveis,

as rochas metamórficas são intermediárias e as rochas sedimentares são as com menor resistência ao intemperismo, ou seja, mais suscetíveis.

Para o presente estudo identificou-se, por sua vez, que as rochas metamórficas apresentam maior grau de suscetibilidade. Entretanto, como existem diversas composições agrupadas em uma mesma classe, a caracterização de cada rocha e seu efeito individual para a suscetibilidade se torna impraticável. Contudo, os resultados se mostraram satisfatórios para a composição do mapa final.

6.2.3 Uso e cobertura do solo

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos quando contadas as cicatrizes para a variável uso e cobertura do solo.

Tabela 13 – Cicatrizes e pesos para a variável uso e cobertura do solo do município de Cunha

Uso e Cobertura do Solo		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Afloramento Rochoso	29	0,04
Água	0	0,00
Eucalipto	1	0,00
Floresta	323	0,40
Pastagem e/ou Agricultura	384	0,48
Solo Exposto	62	0,08
Área Construída	1	0,00
Total	800	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

É possível verificar que as principais classes com cicatrizes de deslizamentos de terra identificadas se referem à pastagem e/ou agricultura, com 384 cicatrizes, seguida de floresta, com 323. As atividades de pastagem e/ou agricultura ocupam a segunda classe mais preponderante da área total do município (32,82%), perdendo apenas para a área de floresta, com 59,57%. A pastagem é responsável por grande parte do desmatamento e exposição do solo uma vez que aumenta a densidade do solo e a taxa de erosão, induzindo a formação de sulcos e ravinas através do escoamento superficial inadequado (EVANS, 1998 *apud* DIAS, 2011). Por assim dizer, é possível entender que a alta fragilidade destas áreas de transição propiciou a

ocorrência destes eventos. É importante ressaltar que tal mapa é referente ao ano de 2011. Algumas classes, sobretudo a atividade agropastoril pode ter avançado sobre áreas antes de floresta, intensificando a problemática da ocorrência de novos deslizamentos de terra.

6.2.4 Declividade

A Tabela 14 apresenta o número de cicatrizes para a variável referente a declividade.

Tabela 14 – Cicatrizes e pesos para a variável declividade do município de Cunha

Declividade		
Classes	Cicatrizes	Pesos
< 5%	5	0,01
5 a 12%	46	0,06
12 a 30%	309	0,39
30 a 47%	334	0,42
> 47%	106	0,13
Total	800	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Foram constatadas 334 cicatrizes de deslizamentos de terra para a classe de 30 a 47%, seguida da classe de 12 a 30%, com 309 cicatrizes. Conforme já mencionado na seção de caracterização da área de estudo, e com base na literatura, para classes muito baixas, com baixas inclinações, a ocorrência de deslizamentos é ínfima; e para inclinações muito altas (acima de 47%), fatores como ocupação e a fixação de raízes estão diretamente ligadas na alta ou baixa suscetibilidade a estes eventos. Entre a faixa de 12 a 47% estão as zonas mais habitadas, mesmo embora acima de 30% sejam necessárias algumas exigências para ocupação.

Deste modo, infere-se que devido à alta declividade do município de Cunha, grande parte de suas áreas possui alta tendência a deslizamentos de terra.

6.2.5 Curvatura Horizontal

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos quando contadas as cicatrizes para a variável curvatura horizontal.

Tabela 15 – Cicatrizes e pesos para a variável curvatura horizontal do município de Cunha

Curvatura Horizontal		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Muito convergente	255	0,32
Convergente	108	0,14
Planar	90	0,11
Divergente	102	0,13
Muito divergente	245	0,31
Total	800	1,00

Fonte: Aatoria própria (2022).

Como pode ser observado, as classes com maior número de cicatrizes identificadas foram a muito convergente, com 255 cicatrizes, seguida da muito divergente, com 245 cicatrizes. Uma vez que a curvatura horizontal está relacionada à intensidade dos processos de migração e acúmulo no solo, e visto que quanto mais convergente um talude, maior a velocidade e concentração de escoamento, e quanto mais divergente um talude, maior a área atingida por esse acúmulo. Desta maneira, entende-se que tais classes são preponderantes para a magnitude e intensidade da ocorrência destes eventos.

6.2.6 Curvatura Vertical

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos quando contadas as cicatrizes para a variável curvatura vertical.

Tabela 16 – Cicatrizes e pesos para a variável curvatura vertical do município de Cunha

Curvatura Vertical		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Muito côncava	478	0,60
Côncava	27	0,03
Retilínea	8	0,01
Convexa	24	0,03
Muito convexa	263	0,33
Total	800	1,00

Fonte: Aatoria própria (2022).

Como identificado, as classes com maior número de cicatrizes foram a muito côncava,

com 478 cicatrizes, seguida da muito convexa, com 263 cicatrizes. A mesma lógica da curvatura horizontal se aplica para a vertical, quanto mais côncava, mais concentrado é a deposição de material, e quanto mais convexa, maior a área de abrangência do material depositado. Uma vez que ambas as variáveis costumam trabalhar concomitantemente, identificou-se nesse estudo que em taludes “muito côncavos-muito convergentes” e “muito convexos-muito divergentes” ocorrem os maiores impactos advindos de materiais, sobretudo de deslizamentos de terra, sendo estas, portanto, importantes variáveis para a determinação de possíveis zonas de ruptura e de ocorrência e intensidade de desastres.

6.2.7 Distância da malha viária

Por fim, a Tabela 17 apresenta os resultados obtidos quando contadas as cicatrizes para a variável distância da malha viária.

Tabela 17 – Cicatrizes e pesos para a variável distância da malha viária do município de Cunha

Distância da malha viária		
Classes	Cicatrizes	Pesos
0 a 249,99 m	314	0,39
250,00 a 499,99 m	203	0,25
500,00 a 999,99 m	160	0,20
≥ 1000,00 m	123	0,15
Total	800	1,00

Fonte: Autoria própria (2022).

A ordem decrescente de distâncias com a maior incidência de cicatrizes de deslizamentos foi: a de 0,00 a 249,99 m, com 314 cicatrizes; seguida da distância de 250,00 a 499,99 m, com 203 cicatrizes; seguida da distância de 500,01 a 1000,00 metros, com 160 cicatrizes; seguida, por fim, a de maior ou igual a 1000,00 metros, com 123 cicatrizes.

Tais valores são condizentes, uma vez que conforme identificado, quanto mais próximo das estradas o processo antrópico é mais forte. Nesta primeira margem de distância é muito comum se situarem pousadas, sedes de fazendas e comércios. Além disso, o próprio corte dos taludes para a execução das estradas são processos que muitas vezes podem desencadear deslizamentos de terra, sobretudo se não houver monitoramento e áreas vegetadas recobrendo as margens destas rodovias.

Assim, finaliza-se o tópico de apresentação dos resultados dos pesos de cada classe de variável para o cálculo da suscetibilidade. No próximo item, portanto, será apresentado o mapa final da suscetibilidade com as cicatrizes plotadas e as áreas dentro as classes pré-estabelecidas.

6.3 SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO MUNICÍPIO DE CUNHA – MAPA FINAL

A primeira análise para a definição da hierarquia das variáveis deveu-se sobretudo ao ponto de cicatriz referente ao local onde houve fatalidades. Uma vez que neste ponto foi atingido o maior grau de desastre (perdas humanas), calibrou-se o modelo desenvolvido por meio deste ponto, relacionando-o com a cicatriz de maior valor de suscetibilidade obtido para o município. Em outras palavras, quanto mais próximo de zero a diferença entre a suscetibilidade máxima e a suscetibilidade onde houveram mortes, mais nivelada estaria a modelagem. Para tanto, a cicatriz com as mortes foi nomeada de “Cicatriz com vítimas”.

O segundo passo entendido foi a influência (o peso) de cada variável no ponto com vítimas fatais. A Tabela 18 apresenta tais valores:

Tabela 18 – Pesos para cada variável referente a cicatriz com vítimas fatais

Variáveis da “Cicatriz com vítimas”	PED	LIT	UCS	DEC	CH	CV	DMV
Pesos obtidos para cada variável	0,85	0,02	0,40	0,42	0,32	0,33	0,39

Fonte: Autoria própria (2022).

As classes referentes a tais pesos referem-se a: pedologia (PED), com Cambissolo; litologia (LIT), referindo-se ao Augen gnaisse, de comportamento metamórfico; declividade (DEC) entre 30,00 e 47,00%; e com curvaturas muito convergente e muito convexa, para curvatura horizontal (CH) e curvatura vertical (CV), respectivamente. Avaliando as demais variáveis e a situação da área onde ocorreu o evento, pôde-se perceber que o desastre ocorreu em uma zona rural e dentro de um raio de 150,00 m da estrada (DMV). Com relação ao uso e cobertura do solo (UCS), identificou-se como sendo zona de floresta, composta por vegetação rasteira e arbórea, com indicativos de exploração agropastoril. A Figura 25 apresenta a caracterização da cicatriz que culminou nas mortes.

Figura 25 – “Cicatriz com vítimas” em Cunha, 01/01/2010



Fonte: Aatoria própria. Dados provenientes de *Google Earth* (2022).

Assim sendo, conforme já citado nas seções 3.5.1 e 5.4, para a definição dos pesos de cada variável, utilizou-se a metodologia AHP, onde os fatores condicionantes foram comparados em uma matriz par a par, hierarquizando a influência deles na ocorrência de deslizamentos de terra. Com o intuito de se atingir a menor diferença entre o maior valor de suscetibilidade e do valor da cicatriz com as vítimas fatais, o melhor resultado obtido desta análise é apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Matriz de comparação das variáveis da suscetibilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha

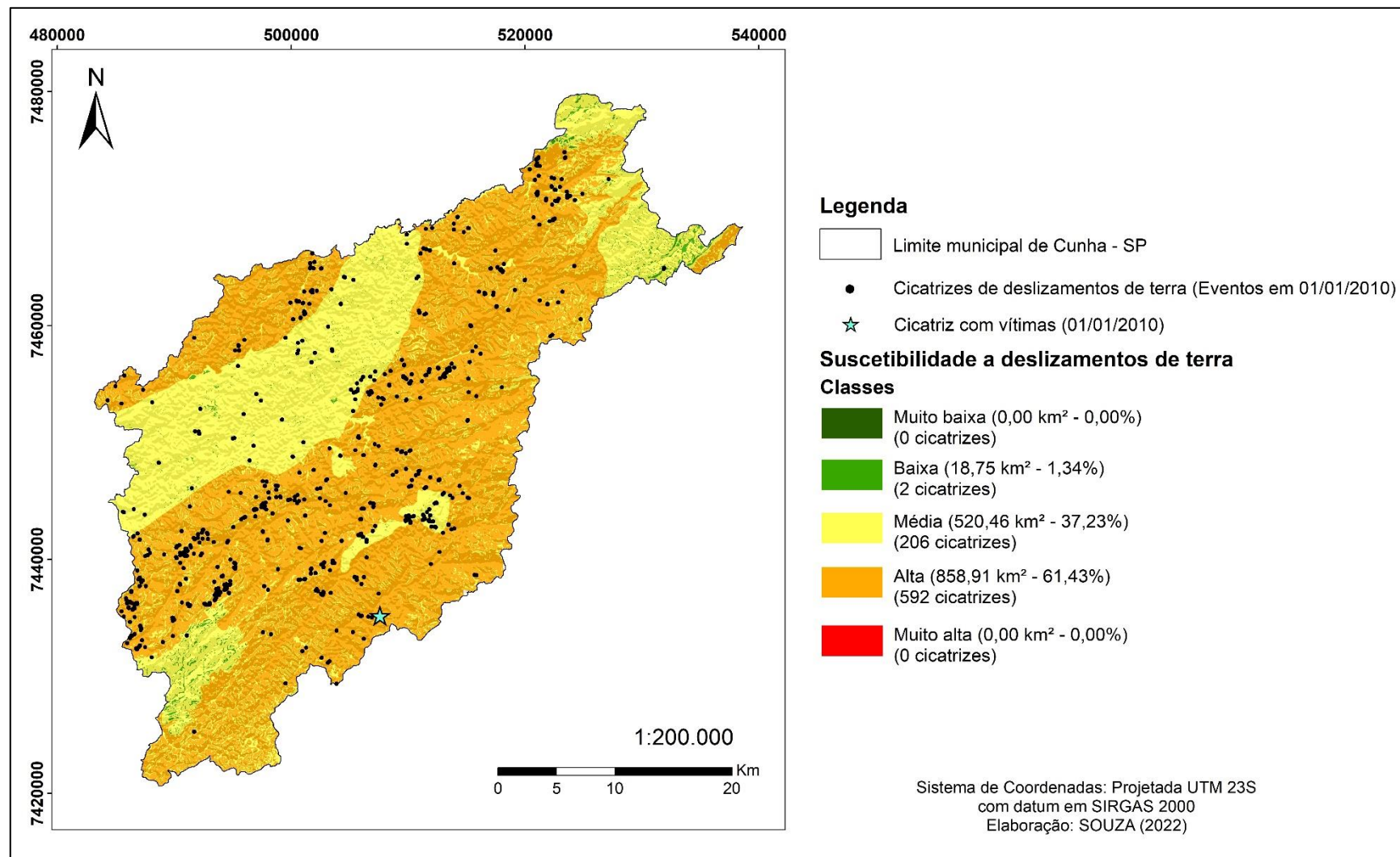
Variáveis	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	w (Pesos)
(1) Distância das Estradas – DMV	1,00	3,00	5,00	7,00	8,00	9,00	9,00	<u>0,34</u>
(2) Declividade - DEC	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00	8,00	9,00	<u>0,27</u>
(3) Pedologia - PED	0,20	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00	7,00	<u>0,19</u>
(4) Curvatura Horizontal - CH	0,14	0,20	0,33	1,00	3,00	4,00	5,00	<u>0,11</u>
(5) Uso e cobertura do solo – UCS	0,13	0,14	0,20	0,33	1,00	2,00	3,00	<u>0,05</u>
(6) Curvatura Vertical – CV	0,11	0,13	0,14	0,25	0,50	1,00	1,00	<u>0,02</u>
(7) Litologia - LIT	0,11	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00	1,00	<u>0,02</u>
Razão de Consistência (RC)	0,09							

Fonte: Aatoria própria (2022).

Com isso, após o cálculo da suscetibilidade pela Equação 6, obteve-se que “0,69” foi o valor de máximo obtido, enquanto que para a “Cicatriz com vítimas”, foi o valor de 0,68, representando, portanto, uma diferença de 0,01.

Por fim, considerando os valores dos índices adotados e tendo todos os demais parâmetros calculados, pôde-se elaborar o mapa da Suscetibilidade a deslizamentos de terra para o município de Cunha, para o dia 01/01/2010. O mapa final é apresentado conforme Figura 26, a seguir.

Figura 26 – Mapa da suscetibilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha



Fonte: Autoria própria (2022).

Diante do que foi apresentado na Figura 26, é possível observar que no dia do evento (01/01/2010), a maior parte do município encontrava-se em situação de suscetibilidade alta. Em outras palavras, dentro o intervalo estabelecido na Tabela 6, 592 cicatrizes tiveram seus pontos de suscetibilidade entre 0,60 e 0,69. Fora estes pontos, a classe de alta suscetibilidade representou 61,43% do município, com 858,91 km². Este indicativo revela que, para o município de Cunha, uma parcela mínima de precipitação seria o necessário para desencadear deslizamentos de terra, uma vez que o limiar para esta ocorrência é de 0,70. Assim sendo, a “Cicatriz com vítimas”, que obteve um valor de 0,68 para a suscetibilidade, já apresentava também uma alta tendência de ocorrência destes tipos de desastres.

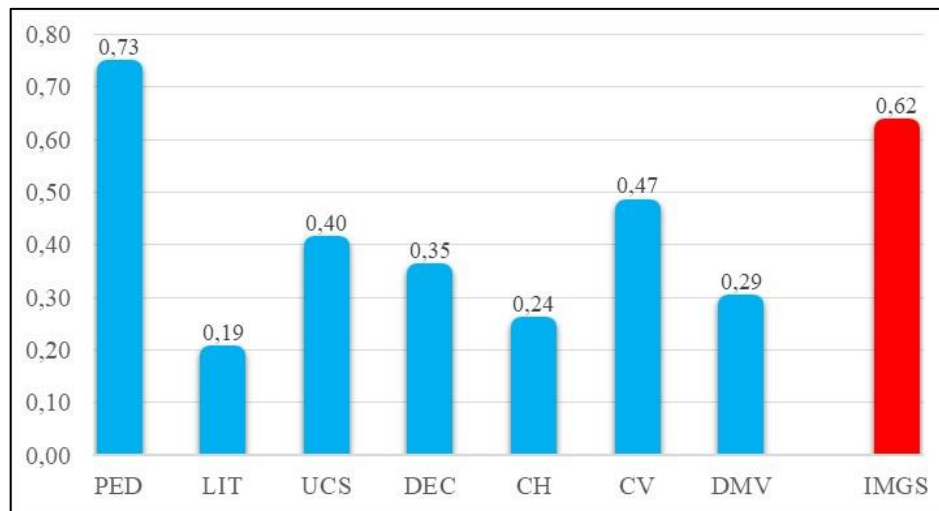
A partir da Figura 26, constata-se que a classe de suscetibilidade média a deslizamentos de terra, com valores variando entre 0,40 e 0,59 (37,23% das áreas do município de Cunha), foi a que apresentou 206 cicatrizes.

Por fim, as classes muito baixa, baixa e muito alta representaram muito pouca influência para o município de Cunha, sendo que apenas a classe de baixa suscetibilidade contabilizou cicatrizes (2) e com uma extensão territorial de 18,75 km², o que representa 1,34% de Cunha. A classe de muito baixa não teve contribuição no município, tal como a classe de muito alta. Esta última classe é esperada, uma vez que para os deslizamentos de terra, segundo o presente estudo, é necessário o deflagrador (chuva) para sua ocorrência, atingindo valores maiores ou iguais a 0,70.

É importante ressaltar ainda que embora o intuito da modelagem com a AHP fosse normalizar o aspecto do mapa final da suscetibilidade, o mesmo ainda se assemelhou ao formato do mapa pedológico. Entretanto, quando apresentado e detalhado os resultados do mapa de vulnerabilidade a deslizamentos de terra, será possível perceber que a chuva é o principal evento deflagrador na ocorrência de deslizamentos.

Desta forma, a partir destes resultados, foi possível calcular através dos valores de suscetibilidade de cada uma das 800 cicatrizes, o Índice Médio Geral de Suscetibilidade (IMGS), apresentado na Figura 27. Este índice tem o intuito de melhor compreender a ação de cada variável perante à suscetibilidade. Representa, portanto, a média de pesos de cada variável, tal como a da suscetibilidade.

Figura 27 – Índice médio geral de cada variável e IMGS

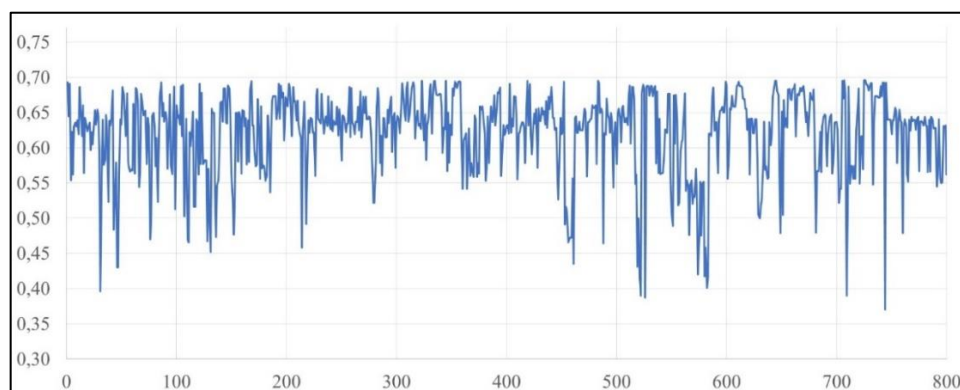


Fonte: Autoria própria (2022).

Desta forma, percebe-se que o IMGS foi de 0,62, ou seja, a maior parte do município foi classificada como sendo de alta suscetibilidade a deslizamentos de terra. A ordem decrescente da preponderância das variáveis foi: pedologia (0,73); curvatura vertical (0,47); uso e cobertura do solo (0,40); declividade (0,35); distância da malha viária (0,29); curvatura horizontal (0,24); e litologia (0,19). Salienta-se que para ocorrência de deslizamentos é necessário que o resultante da modelagem apresente valor maior ou igual a 0,70, sendo que apenas uma variável, ainda que com valores acima de 0,70, não é capaz de isoladamente deflagrar estes tipos de evento.

Por fim, a Figura 28 apresenta os valores de suscetibilidade obtidas para cada cicatriz de deslizamentos de terra. Os valores variaram entre um mínimo de 0,37 até um máximo de 0,69, sendo a média de 0,62, conforme já apontado pelo IMGS.

Figura 28 – Suscetibilidade a deslizamentos de terra para o município de Cunha, valores para as 800 cicatrizes (01/01/2010)



Fonte: Autoria própria (2022).

6.4 VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO MUNICÍPIO DE CUNHA

6.4.1 Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra

Conforme previamente apresentado na seção 5.5.1 (Equação 7), o mapa de vulnerabilidade para o município de Cunha foi gerado através da álgebra de mapas no *software* ArcGIS® 10.8, utilizando o mapa da suscetibilidade, com os respectivos mapas dos índices pluviométricos obtidos para o dia 01/01/2010 (representados pelas Figuras 15 a 18). O mapa de vulnerabilidade é apresentado na Figura 29.

O mapa gerado revelou que 1.361,78 km², o que equivale a 97,39% da área do município, se encontrava em situação de muito alta vulnerabilidade, com a ocorrência de 793 cicatrizes, seguida da classe de alta vulnerabilidade, com 36,44 km², equivalente a 2,64% da área de Cunha, com 7 cicatrizes. Nas demais classes não foram observados deslizamentos de terra.

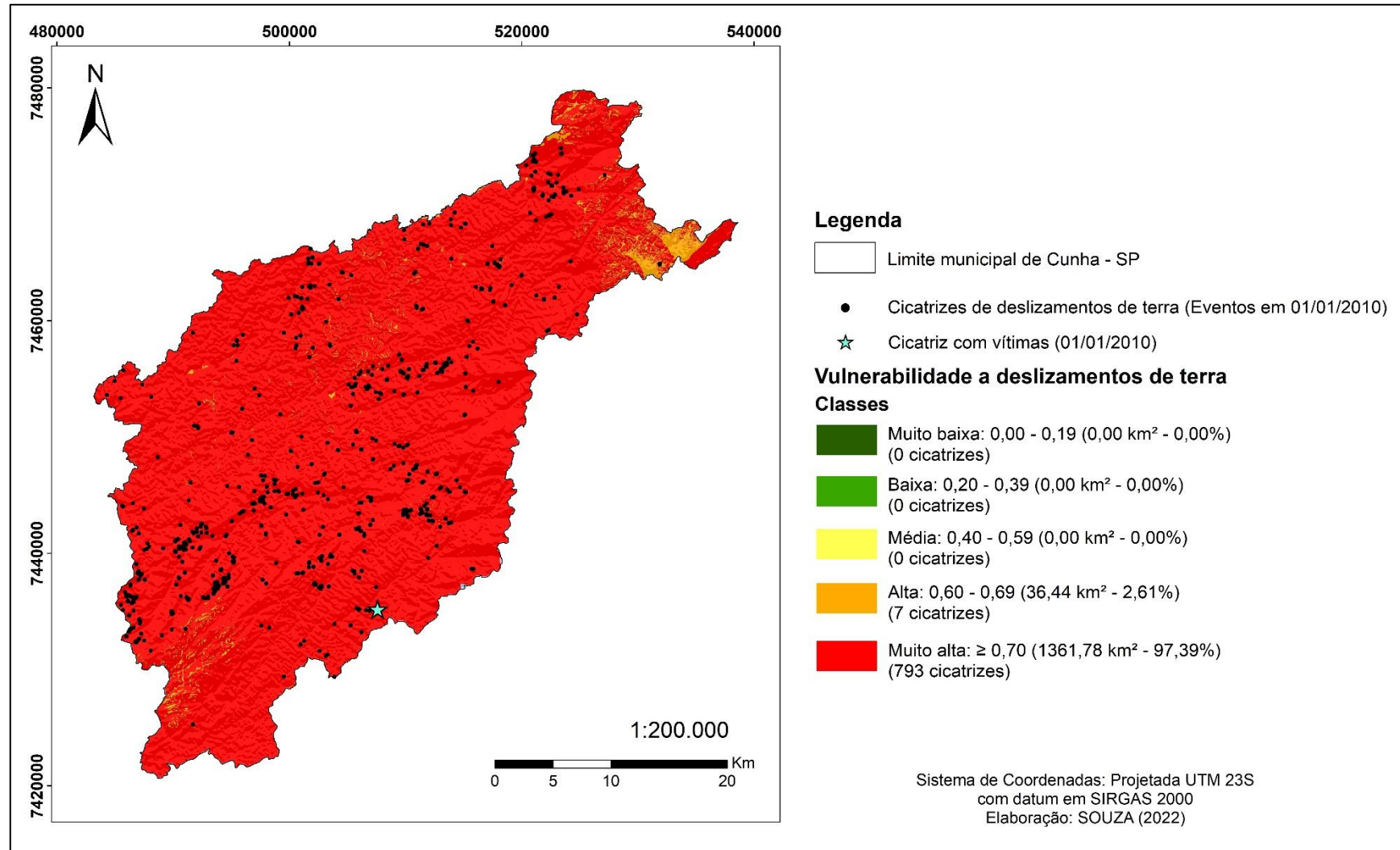
O Índice Médio da Vulnerabilidade Diária (IMVD) encontrado foi de 0,80, enquanto o valor da vulnerabilidade para a cicatriz que houve as mortes, apontou o valor de 0,83.

Assim, os índices adotados para as classes de vulnerabilidade que foram padronizados e apresentados na Tabela 7, com intervalos de 0,00 a 0,19 (muito baixa vulnerabilidade); 0,20 a 0,39 (baixa); 0,40 a 0,59 (média); 0,60 a 0,69 (alta); e $\geq 0,70$ (muito alta), apontaram que para todo o mapa de Cunha, os índices de vulnerabilidade obtidos foram maiores ou iguais ao valor de 0,70.

Com esta forma de avaliar, entretanto, foi possível observar que os resultados não foram muito representativos. Na maneira como está elucidado, fica difícil fazer considerações acerca de regiões específicas do município, dando a impressão de que todo o município, para o dia do evento, apresentou a mesma característica e teve o mesmo comportamento.

Este tipo de resultado ocorre devido à forma como são distribuídos os pixels na álgebra de mapas dentro do ArcGIS®. A forma como foi realizada para este caso refere-se à classificação manual, onde determina-se um intervalo desejado e os pixels (onde para o presente caso foram 1.553.586) são distribuídos igualmente dentro deste intervalo. Verificou-se, portanto, que a presente classificação não foi satisfatória, necessitando também novos ajustes para melhor espacialização e representação das áreas mais vulneráveis do município de Cunha.

Figura 29 – Prévia do mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha



Fonte: Autoria própria (2022).

Diante do resultado exposto, buscou-se outras classificações que a técnica de álgebra de mapas disponibiliza para melhor categorizar a vulnerabilidade, e melhorar a avaliação das áreas mais ou menos críticas do município.

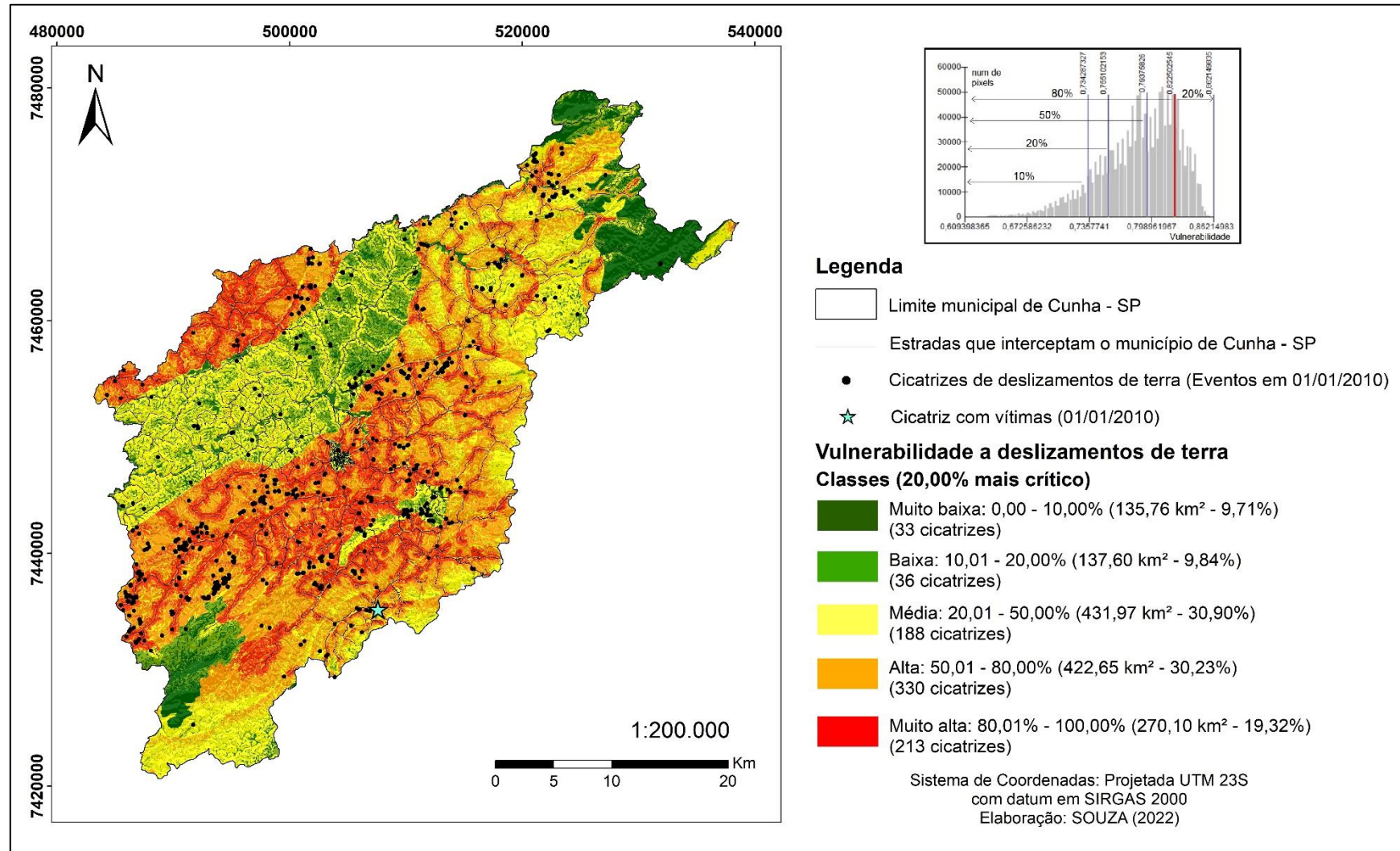
A categorização adotada, portanto, como alternativa de representação, foi a chamada “quantil”, que divide as classes de vulnerabilidade a partir de percentis encontrados no histograma resultante da álgebra de mapas. Este tipo de procedimento visa hierarquizar as áreas mais críticas em relação as menos críticas. O resultado obtido através dessa metodologia é possível ser observado na Figura 30.

Este tipo de classificação é feito para vários fenômenos da natureza, onde se procura definir um limiar crítico que, a partir deste, há a ocorrência de eventos considerados extremos/raros (espacial e temporalmente). Pode-se citar esta ocorrência na análise, por exemplo, de dados pluviométricos. No caso, a distribuição temporal das chuvas ao longo de um determinado período é avaliada estatisticamente, de forma que as chuvas que correspondem ao chamado percentil 99% são àquelas consideradas como eventos muito extremos. Em outras palavras, são chuvas que não ocorrem 99% das vezes em uma região ao longo de um determinado período (SILVA, L. 2014).

Para o caso da vulnerabilidade a deslizamentos de terra para Cunha, testaram-se diversas configurações de quantis de modo a se definir as áreas que representassem as situações mais críticas com condição de deslizamentos, ou seja, de muito alta vulnerabilidade a estes tipos de desastres. Para auxiliar na categorização dessas classes, alguns trabalhos foram tomados como referência para melhor definição. Segundo a literatura, o estudo que melhor se assemelhou ao presente estudo, em termos de variáveis, foi o de Jaafari *et al.* (2014), que investigaram a suscetibilidade a deslizamentos de terra em uma floresta do Irã, tomando como base variáveis semelhantes ao caso aqui estudado, como a litologia, declividade, curvatura vertical, precipitação e o levantamento de 103 deslizamentos. Para os autores, as classes consideradas de alta e muito alta suscetibilidade envolveram aproximadamente 50% da área de estudo, quase que divididos igualmente (24,93% para alta suscetibilidade e 24,52% para muito alta). Desta maneira, de acordo com os testes para Cunha, verificou-se que respectivamente 30% e 20% para as classes de alta e muito alta apresentaram os resultados mais satisfatórios.

Em outras palavras, a classe de vulnerabilidade muito alta está acima de 80% dos valores encontrados para Cunha, significando ser os 20% mais críticos. Além disto, para muito baixa e baixa delimitou-se o quantil de 10%; enquanto para média e alta, os quantis de 30%, conforme observado na Figura 30.

Figura 30 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha – 20,00% mais críticos



Fonte: Autoria própria (2022).

Com relação a Figura 30 identificou-se mais de 25% das cicatrizes na classe de muito alta vulnerabilidade (213 cicatrizes). Se analisarmos como um todo, da média a muito alta, classes estas consideradas as de maior grau de importância, foram contabilizadas 731 cicatrizes, o que corresponde a 91,38% do montante levantado de 800 cicatrizes. Em níveis de assertividade, quanto maior o número de cicatrizes inseridas nestas classes mais críticas, melhor o resultado. Desta maneira, nas classes baixa e muito baixa, foram registrados apenas 33 e 36 cicatrizes, totalizando 8,62% do montante registrado. Com isso, identifica-se que a técnica adotada para a obtenção do mapa de vulnerabilidade a deslizamentos de terra apresentou resultados mais satisfatórios frente às áreas mais críticas do município de Cunha.

Em termos de precipitação foi verificado que os menores valores para ocorrência de deslizamentos foram:

- Precipitação diária (PD): 15,70 mm;
- Precipitação acumulada de 5 dias (PA5): 79,30 mm;
- Coeficiente de precipitação crítica (CPC): 15,00 mm; e
- Máxima precipitação acumulada de 5 dias (MAXPA5): 135,82 mm.

Portanto, entende-se que diante das características do município de Cunha e da exposição às condições climáticas, eventos de precipitação diária da grandeza de 15,00 mm já seriam suficientes para deflagrar novos eventos de deslizamentos de terra. Além disso, é necessário se verificar também a saturação do solo, uma vez que a infiltração é uma das principais responsáveis pelo rompimento de taludes e movimentos de massa (CAMPOS, 2017).

Com relação aos quantis, a Tabela 20 apresenta os intervalos de variação de cada classe de vulnerabilidade, em função da distribuição dos pixels no histograma do mapa da Figura 30.

Tabela 20 – Limiares de criticidade para as classes de vulnerabilidade

Classe / % mais crítica	Muito baixa (10%)	Baixa (10%)	Média (30%)	Alta (30%)	Muito alta (20%)
Vulnerabilidade	0,61 – 0,73	0,73 – 0,76	0,76 – 0,79	0,79 – 0,82	0,82 – 0,86

Fonte: Autoria própria (2022).

Com essa nova classificação e análise do histograma, permite-se melhores correlações frente à distribuição dos deslizamentos ao longo do município. A densidade de deslizamentos de terra (DD), relação que estabelece as cicatrizes/km² obtidas no levantamento do mapa de vulnerabilidade, revela a ocorrência dentre cada classe, conforme visto na Tabela 21.

Tabela 21 – Densidade de deslizamentos de terra (DD) por km²

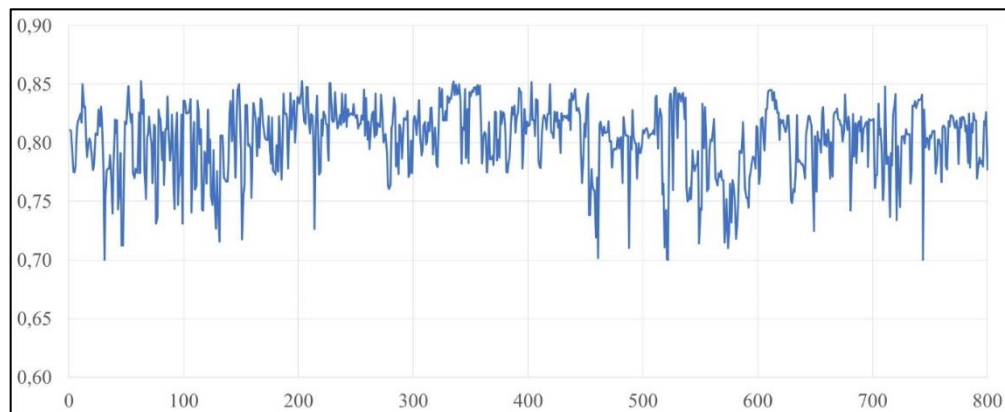
Vulnerabilidade	Cicatrizes	Área (km ²)	DD
Muito baixa	33	135,76	0,24
Baixa	36	137,60	0,26
Média	188	431,97	0,44
Alta	330	422,65	0,78
Muito alta	213	270,10	0,79
Total	800	1.398,08	-

Fonte: Autoria própria (2022).

Diante do exposto, verifica-se que a DD máxima obtida foi de 0,79 cicatrizes/km², para a classe muito alta. Alguns autores relatam que frequências muito altas de deslizamentos de terra são por volta de 1,79 (SARKAR; KANUNGO, 2004). Entretanto, para Cunha é preciso verificar que as áreas são muito grandes, mesmo com número elevado de cicatrizes. É possível perceber que em algumas áreas houve maior concentração de deslizamentos, enquanto em outras, menor. Como justificativa para tal comportamento, Rickli e Graf (2009) citam que o uso e cobertura da área de interesse, a citar florestas e áreas descampadas, são essenciais para a variação deste comportamento da densidade de deslizamentos.

A seguir é apresentada a Figura 31 que revela os valores de vulnerabilidade obtidos para as 800 cicatrizes de deslizamentos de terra. Pela extração da imagem, identificou-se que os valores oscilaram de um mínimo de 0,70, atingindo um valor máximo na ordem de 0,86.

Figura 31 – Vulnerabilidade a deslizamentos de terra para o município de Cunha, valores para as 800 cicatrizes (01/01/2010)



Fonte: Autoria própria (2022).

Ressalta-se por fim, através da comparação entre a presente modelagem e o levantamento de imagens e notícias já aqui apresentados, que as áreas mais atingidas pelos eventos de janeiro

de 2010 foram as zonas rurais, com quedas de pontes, barreiras, além da destruição e interdição de estradas, que isolaram totalmente bairros e impediram ações emergenciais de auxílio do poder público junto a população local. A modelagem, portanto, conseguiu identificar diversas destas áreas críticas e trazer pontos centrais para a busca de soluções efetivas no combate a estes problemas recorrentes no município.

E, para melhor entender o comportamento das variáveis frente à vulnerabilidade muito alta (270,10 km²), analisou-se as características classe a classe para cada variável.

6.4.1.1 Pedologia

Com relação a pedologia, praticamente toda classe muito alta se situa nos Cambissolos (99,93%). A Tabela 22 apresenta tal distribuição de acordo com as suas classes.

Tabela 22 – Distribuição das classes da pedologia dentre a vulnerabilidade muito alta

Pedologia		
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
Área Urbana	0,03	0,01
Cambissolos	269,92	99,93
Gleissolos	0,01	0,004
Latossolos	0,09	0,03
Neossolos	0,05	0,02
Total	270,10	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

Os Cambissolos são derivados de diversos materiais de origem encontrados em variados ambientes climáticos e tipos de relevos (ANTUNES *et al.*, 2013). São rasos e de elevada erodibilidade, podendo rapidamente ocorrer exposição do subsolo, seguidos de processos como erosão laminar moderada ou severa, bem como em sulcos e voçorocas (EMBRAPA, 2003).

6.4.1.2 Litologia

Com relação a litologia, novamente foi verificada a maior presença de rochas do tipo Biotita gnaisse, com 27,64% da área de muito alta vulnerabilidade, seguidos da classe de Gnaisse aluminoso, com 23,99% e da Biotita granito, onde a composição das duas classes preponderantes em que estão situadas representam 15,78% e 13,79%, respectivamente. Desta forma, identifica-se que as rochas do tipo metamórficas foram as que mais se sobressaíram quando analisado a vulnerabilidade muito alta separadamente.

A Tabela 23 apresenta a distribuição das áreas das classes da litologia frente a vulnerabilidade muito alta.

Tabela 23 – Distribuição das classes da litologia dentre a vulnerabilidade muito alta

Litologia		
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
Biotita granito	37,25	13,79
Granito, Granito pórfiro	4,33	1,60
Gnaise, Migmatito, Ortognaise, Rocha calcissilicática, Trondhjemitito	0,003	0,00
Gnaise aluminoso, Rocha calcissilicática	64,80	23,99
Milonito, Quartzito, Rocha calcissilicática, Rocha metaultramáfica	26,89	9,96
Biotita gnaise, Biotita xisto, Gnaise quartzoso, Milonito, Rocha calcissilicática	74,65	27,64
Granito	0,12	0,04
Anfibolito, Gnaise milonítico, Granada gnaise, Mármore, Metamarga, Quartzito	2,38	0,88
Augen gnaise, Biotita gnaise, Biotita granito, Biotitito, Gnaise, Migmatito, Muscovita-biotita gnaise, Ortognaise, Tonalito	10,77	3,99
Biotita granito, Monzogranito	3,25	1,20
Biotita granito, Granito gnáissico, Monzogranito, Muscovita granito	42,63	15,78
Granito, Granodiorito, Monzogranito	3,02	1,12
Total	270,10	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

6.4.1.3 Uso e cobertura do solo

Com relação a variável uso e cobertura do solo, dos 270,10 km² da classe de muito alta vulnerabilidade, observou-se que a maior classe verificada foi a de floresta, com 139,49 km², representando 51,64%, seguido das áreas de agricultura e/ou pastagem, com 114,81 km² (42,51%).

É importante ressaltar que devido à escala utilizada (30 metros), o algoritmo não conseguiu identificar parcelas que fossem representativas da malha viária, sendo que estas estradas acabaram sendo envoltas pelas classes adjacentes.

A Tabela 24 apresenta a distribuição das áreas das classes do uso e cobertura do solo frente à vulnerabilidade muito alta.

Tabela 24 – Distribuição das classes da uso e cobertura do solo dentre a vulnerabilidade muito alta

Uso e Cobertura do Solo		
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
Afloramento Rochoso	2,51	0,93
Água	0,02	0,01
Eucalipto	0,72	0,27
Floresta	139,49	51,64
Pastagem e/ou Agricultura	114,81	42,51
Solo Exposto	12,25	4,53
Área Construída	0,30	0,11
Total	270,10	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

6.4.1.4 Declividade

Com relação à declividade, 60,88% das áreas de muito alta vulnerabilidade ocorreram em áreas de 12 a 30% de inclinação e 32,89% em declividades de 30 a 47%, como pode ser observado na Tabela 25.

Tabela 25 – Distribuição das classes da declividade dentre a vulnerabilidade muito alta

Declividade		
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
< 5%	1,32	0,49
5 a 12%	12,22	4,53
12 a 30%	164,35	60,88
30 a 47%	88,79	32,89
> 47%	3,28	1,22
Total	270,10	100,00

Fonte: Autoria própria (2022).

A declividade é um dos fatores básicos ligados às condições de instabilidade de encostas, pois quanto maior a declividade, maior a velocidade de deslocamento de material (RODRIGUES, 2013). Entretanto, em declividades muito altas (como aquelas superiores a 47%), a instabilidade diminui por não se ter material disponível para escorregar (EFFGEN, 2015).

6.4.1.5 Curvaturas horizontal e vertical

Com relação às curvaturas observa-se que na Tabela 26, que as maiores parcelas das áreas de muito alta vulnerabilidade apresentam curvatura horizontal muito divergente (39,50%) e muito convergente (32,88%), e apresentam curvatura vertical muito côncava (55,92%) e muito convexa (36,52%). Nota-se, portanto, o predomínio de áreas de extrema concavidade ou convexidade, além de muita convergência e divergência. Essas áreas são responsáveis, portanto, por concentrarem grandes fluxos de matéria em encostas (VALERIANO, 2008).

Tabela 26 – Distribuição das classes das curvaturas horizontal e vertical dentre a vulnerabilidade muito alta

Curvatura Horizontal	Classes	Área (km ²)	Porcentagem (%)
	Muito convergente	88,82	32,88
	Convergente	25,68	9,51
	Planar	20,69	7,66
	Divergente	28,23	10,45
	Muito divergente	106,68	39,50
Total		270,10	100,00
Curvatura Vertical	Classes	Área (km ²)	Porcentagem (%)
	Muito côncava	151,04	55,92
	Côncava	7,82	2,90
	Retilínea	5,15	1,91
	Convexa	7,44	2,76
	Muito convexa	98,65	36,52
Total		270,10	100,00

Fonte: A autoria própria (2022).

Fernandes e Amaral (1996) apontam que grande parte dos movimentos de massa registrados no mundo ocorrem em áreas de concavidade (*hollows*). Além disso, a forma do terreno que associa curvaturas côncavo-convergente propicia máxima concentração e acúmulo do escoamento, o que favorece a saturação do solo e, conseqüentemente, a ocorrência de movimentos de massa (RODRIGUES, 2013).

6.4.1.6 Distância da malha viária

Por fim, com relação à variável distância da malha viária, verificou-se que a imensa maioria da vulnerabilidade muito alta foi identificada na classe de 0 a 249,99 m.

Em outras palavras, os deslizamentos de terra de classe muito alta se concentraram às margens das rodovias levantadas para Cunha. A Tabela 27 apresenta tais resultados.

Tabela 27 - Distribuição das classes da distância da malha viária dentre a vulnerabilidade muito alta

Distância da malha viária		
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
0 a 249,99 m	201,01	74,42
250,00 a 499,99 m	47,02	17,41
500,00 a 999,99 m	21,07	7,80
≥ 1000,00 m	1,00	0,37
Total	270,10	100,00

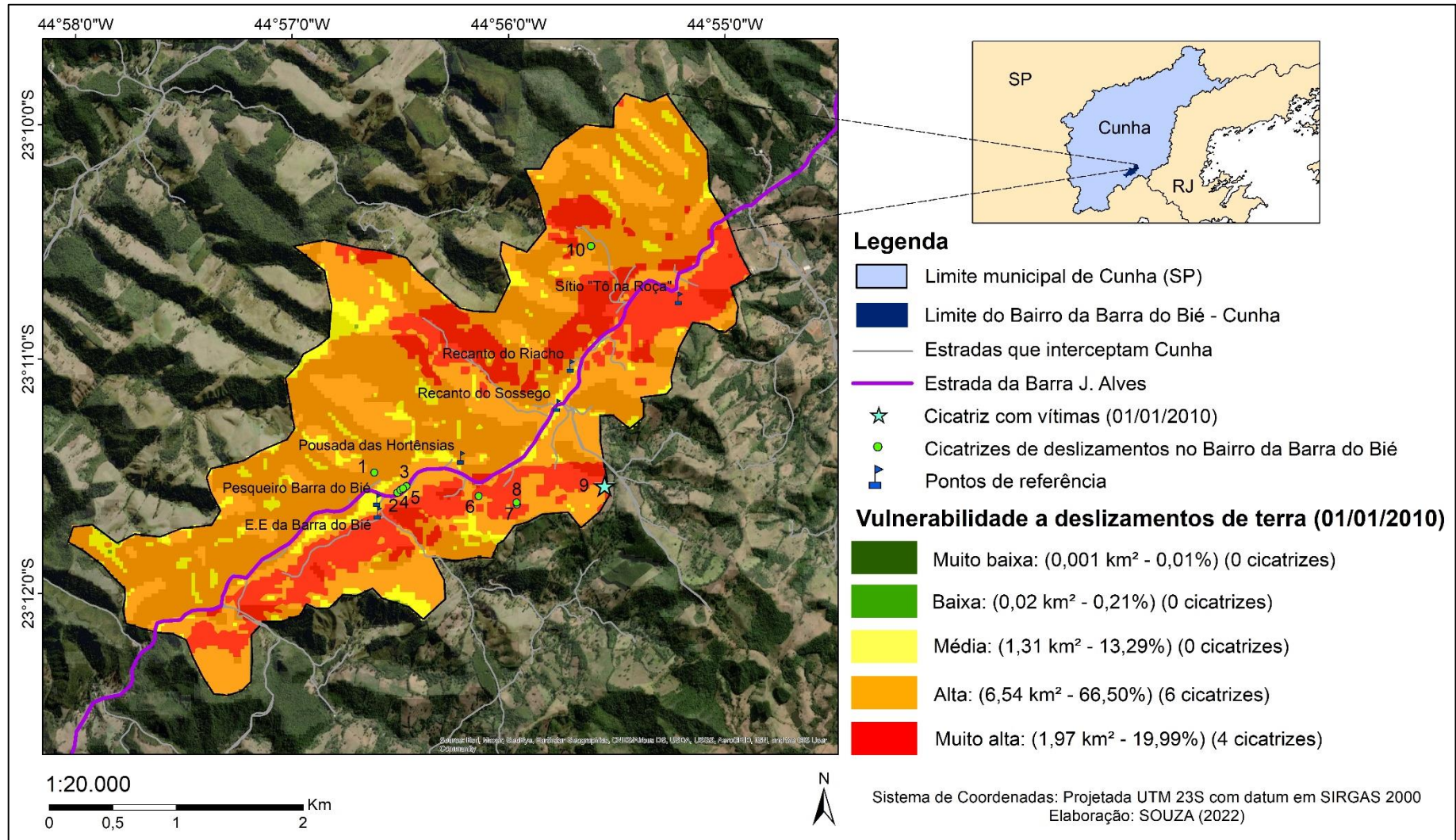
Fonte: Autoria própria (2022).

É interessante ressaltar que anteriormente, nos mapas de suscetibilidade e de vulnerabilidade sem os percentis, tal variável não se destacava, entretanto, quando categorizado pelos percentis, verificou-se como ela é de suma importância para a análise das principais áreas mais críticas e vulneráveis a estes eventos, visto que às margens destas rodovias, e não tão distantes, são as áreas onde mais se concentram populações, com residências, escolas, igrejas entre outras ocupações humanas.

6.4.2 Análise do bairro da Barra do Bié – região onde houve mortes em 2010 em decorrência dos deslizamentos

Por fim, para finalizar o estudo frente à vulnerabilidade do 01/01/2010, foi realizado um recorte para avaliar a área onde houve as mortes. O bairro da Barra do Bié possui aproximadamente 9,83 km² (0,70% do município de Cunha) e está situado em sua zona rural. O bairro possui alguns pontos para turismo, como pousadas e pesqueiros, além de uma Escola Estadual e foi um dos mais afetados pelos deslizamentos em janeiro de 2010. Através da Figura 32, foram identificadas 10 cicatrizes de deslizamentos no bairro, com a “Cicatriz com vítimas” localizada próxima a uma de suas estradas principais. Esta e outras 3 cicatrizes se situaram em classe muito alta, sendo equivalente a 1,97 km² da área do bairro. A classe de alta vulnerabilidade a deslizamentos, por sua vez, referente a 6,54 km² da área do bairro, contabilizou 6 cicatrizes. A classe de média vulnerabilidade ocupou 1,31 km² do bairro, porém não foram contabilizadas cicatrizes para este intervalo. A Figura 32, a seguir, apresenta os referidos detalhes citados.

Figura 32 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no bairro da Barra do Bié em Cunha/SP



Fonte: Autoria própria (2022).

Pôde-se por fim, avaliar e inferir que as áreas mais afetadas tanto no bairro da Barra do Bié, quanto na maioria do município de Cunha, foram àquelas próximas as estradas. No caso do bairro da Barra do Bié, a Estrada da Barra J. Alves, pela Figura 32 concentrou a maioria das ocorrências de deslizamentos, tal como as maiores parcelas de vulnerabilidade muito alta.

Em termos de precipitação foi verificado que os valores para este bairro variaram de:

- Precipitação diária (PD): 21,07 – 33,85 mm;
- Precipitação acumulada de 5 dias (PA5): 107,47 – 143,26 mm;
- Coeficiente de precipitação crítica (CPC): 20,00 – 30,00 mm; e
- Máxima precipitação acumulada de 5 dias (MAXPA5): 165,73 – 176,09 mm.

Apenas para fins comparativos, a Tabela 28 apresenta os valores da suscetibilidade, climatológicos, e por fim, a vulnerabilidade para as 10 cicatrizes registradas no bairro da Barra do Bié. É possível observar que para a “Cicatriz 9” (onde ocorreu as mortes), os valores de precipitação responsáveis pela deflagração de deslizamentos foram na ordem de 24,24 mm e 115,41 mm para PD e PA5, respectivamente. Conforme esperado, esses valores ultrapassaram os limiares de 15,00 mm de PD e 79,30 mm para PA5, condições mínimas para ocorrência de eventos de deslizamentos de terra no município de Cunha. Para as demais cicatrizes na Barra do Bié, a mesma condição foi atendida, acarretando também os mesmos tipos de evento. Cabe salientar que alguns dos valores das cicatrizes se aproximaram do índice de 0,86 - valor máximo obtido de vulnerabilidade dentre as 800 cicatrizes.

Tabela 28 – Valores obtidos para as 10 cicatrizes do bairro da Barra do Bié

Cicatrizes	S	PD	PA5	CPC	MAXPA5	V
(1)	0,68	26,22	121,31	25,00	171,16	0,81
(2)	0,69	25,39	119,08	25,00	170,83	0,81
(3)	0,62	25,43	119,18	25,00	170,78	0,77
(4)	0,68	25,35	118,97	25,00	170,79	0,80
(5)	0,68	25,47	119,29	25,00	170,81	0,80
(6)	0,67	24,38	115,90	20,00	169,42	0,83
(7)	0,68	23,95	114,71	20,00	169,12	0,83
(8)	0,68	23,95	114,71	20,00	169,12	0,82
(9) Cicatriz com vítimas	0,69	24,24	115,41	20,00	168,67	0,83
(10)	0,69	30,62	133,69	30,00	168,43	0,82

Fonte: Autoria própria (2022).

6.5 PROJEÇÕES CLIMÁTICAS ETA HADGEM-ES RCP 4.5 – OCORRÊNCIA DE NOVOS EVENTOS ENTRE 2023 E 2040

Como já mencionado na seção 5.6, da Metodologia, foram projetados os valores de precipitação para o período de 2023 a 2040 para Cunha. Desta maneira, para este presente estudo, foram identificados como limiares climatológicos de deslizamentos de terra, os valores de 15,00 mm de precipitação diária ou 79,30 mm de precipitação acumulada de 5 dias. A partir dos mesmos, coletou-se os dias e os valores em que tais condições foram alcançadas, além também do valor da máxima precipitação acumulada de 5 dias, dentre o novo período de interesse. A partir disto, novamente foram calculados os índices de vulnerabilidade para as 800 cicatrizes. Cabe-se salientar que estes limiares

Por assim dizer, pelos cálculos realizados, e segundo os dados de precipitação de chuvas futuras gerados pelo modelo regional Eta HadGEM-ES com cenário RCP 4.5 de mudanças climáticas, para o período 01/01/2023 a 30/12/2040, poderá haver 70 datas do citado período com situações de deslizamentos de terra nas áreas do município de Cunha, cujos índices de vulnerabilidade levantados apresentaram valores maiores ou iguais a 0,70.

Os efeitos destes novos eventos de precipitação de chuvas em Cunha podem ter reflexos em municípios adjacentes, como o de Lagoinha e São Luiz do Paraitinga, principalmente no que se refere às inundações, citando as ocorridas nestes municípios em janeiro de 2010. Uma vez que o Rio Jacuí possui nascente em Cunha, e o Rio Paraitinga nasce em Areias e possui parcela importante que cruza o município de Cunha, o expressivo volume hídrico de chuvas impacta diretamente municípios limítrofes, sendo capazes de extravasar e desencadear outros tipos de desastres naturais, sobretudo os de caráter hidrológico.

Desta maneira, diante da possibilidade de um elevado número de novos eventos extremos, observa-se e entende-se que com estes resultados é de extrema importância e necessário que o poder público tenha acesso a estes dados e assim desenvolva e implemente novas políticas públicas relacionadas ao uso e ocupação do solo, bem como de alerta e monitoramento de eventos de precipitação, de modo a tornar a comunidade mais resiliente frente a estes tipos de desastres, mitigando novos problemas sociais (perdas humanas), ambientais e econômicos, não apenas no município de estudo, como também no seu entorno, sendo importante uma comunicação entre órgãos públicos e uma gestão integrada e regional frente aos desastres ambientais.

7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo permitiu a adaptação, através Processo Analítico Hierárquico - AHP, da modelagem de suscetibilidade a deslizamentos de terra desenvolvida por Silva, L. (2014), para uma nova área de estudo (Equação 6). Com isso, avaliou-se as áreas do município de Cunha mais suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra. A modelagem inicialmente prevista para calcular a suscetibilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha, abrange as variáveis ambientais pedologia, litologia, uso e cobertura do solo, declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical. Porém, tendo em vista que o município possui grande extensão territorial, muitos bairros rurais distantes da sede urbana, e diversas estradas vicinais com comprimento em torno de 1.925,00 km, identificou-se a importância da inclusão da variável de infraestrutura, aqui denominada distância da malha viária.

A metodologia aplicada para a vulnerabilidade, por sua vez, foi a mesma que a desenvolvida por Silva, L. (2014). A data escolhida para a análise foi a de 01/01/2010, quando com a ocorrência de alta precipitação de chuvas no município de Cunha, diversos eventos de deslizamentos de terra foram desencadeados em sua extensão territorial, inclusive culminando na morte de 6 pessoas. Para esta data, dentre a grande quantidade de movimentos de massa que ocorreram, no presente estudo conseguiu-se identificar 800 cicatrizes.

Foi possível verificar que as ocorrências das cicatrizes se concentraram nas classes: Cambissolos, para a pedologia; Biotita gnaiss, para a litologia; floresta e agricultura e/ou pastagem, para o uso e cobertura do solo; declividades entre 30 e 47%; muito convergente para a curvatura horizontal; muito côncava para a curvatura vertical; e distância da malha viária no intervalo de 0,00 a 249,99 m.

Dos resultados obtidos para a suscetibilidade a deslizamentos de terra, verificou-se que a variável preponderante para o mapeamento foi a pedologia, com índice médio de 0,73, enquanto o Índice Médio Geral de Suscetibilidade (IMGS), de todas as variáveis da modelagem, foi de 0,62. De maneira decrescente, após a pedologia, as variáveis preponderantes foram curvatura vertical (0,47), uso e cobertura do solo (0,40), declividade (0,35), distância da malha viária (0,29), curvatura horizontal (0,24) e litologia (0,19). Os valores no mapa final da suscetibilidade variaram entre 0,37 e 0,69. Conforme esperado, para a ocorrência de deslizamentos de terra, deve-se atingir valores maiores ou iguais a 0,70.

Assim, munido dos resultados das variáveis climatológicas de precipitação diária (PD), precipitação acumulada de 5 dias (PA5), coeficiente de precipitação crítica (CPC) e máxima precipitação acumulada de 5 dias (MAXPA5), obteve-se o mapa final de vulnerabilidade a

deslizamentos de terra, através da Equação 7. Os valores obtidos para este resultado variaram de 0,70 a 0,86. É importante destacar que para o município de Cunha, valores de precipitação diária acima de 15,00 mm ou precipitação acumulada de 5 dias de 79,30 mm, poderá haver eventos de deslizamentos de terra. Utilizando um percentil de 20,00% para a classe de vulnerabilidade muito alta, a densidade de deslizamentos de terra (DD) para Cunha nesta classe foi de 0,79 deslizamentos/km². Os resultados obtidos para a maior incidência de muito alta vulnerabilidade, por sua vez, foi semelhante ao encontrado para os pesos das cicatrizes frente às suas variáveis e respectivas classes.

Avaliando o bairro onde houve as 6 mortes, a Barra do Bié, identificou-se também que 20,00% da área do bairro se situava em vulnerabilidade muito alta, inclusive da “Cicatriz com vítimas”, onde para tal evento a vulnerabilidade encontrada foi de 0,83, com precipitação diária de 24,24 mm, precipitação acumulada de 115,41 mm, coeficiente de precipitação crítica de 20,00 mm e máxima precipitação acumulada de 5 dias de 168,67 mm. Estes valores foram maiores do que para outros pontos de cicatrizes.

Por fim, do ponto de vista das projeções climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5, avaliando o período de 2023 a 2040, foram verificados que em 70 outras diferentes datas, eventos extremos de precipitação podem ocorrer, com a possibilidade de ocorrer novos deslizamentos de terra. Deve-se, portanto, investir em políticas públicas para prevenção destes tipos de desastres no município de Cunha, a citar os problemas de quedas de barreiras e pontes que ocorreram e impactaram principalmente a região rural de Cunha, isolando diversas comunidades e impedindo a ação da Defesa Civil, entre outros órgãos. Deve-se, portanto, haver foco principalmente na expansão das ocupações e nas estradas que interligam todo o município.

Os resultados apresentados reforçam um maior comprometimento com a Agenda 2030 da ONU através dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mecanismos esses que podem auxiliar na redução de eventos de deslizamentos de terra e de seus impactos sobre as populações. Entre esses ODS pode-se citar como pertinentes a este estudo o:

- Objetivo 10: reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade e aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos,

mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar, de acordo com o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, o gerenciamento holístico do risco de desastres em todos os níveis.

- Objetivo 13: Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas.

Embora os resultados alcançados tenham sido coerentes frente aos deslizamentos de terra ocorridos no município de Cunha, é importante frisar que para a obtenção deles, um tempo de médio a longo prazo foi necessário. Devido à falta de elementos necessários para o presente estudo, como informações da literatura, e dados georreferenciados, o contato direto com alguns setores da comunidade, como blogs, sites, e moradores, sobretudo de caráter local, foram essenciais para se fazer um levantamento satisfatório. Contudo, ressalta-se que devido à grande importância da temática envolvida, a descentralização dessas informações aponta uma fragilidade na organização e mobilização para propostas efetivas de cuidado perante o município e sua população. Embora o município possua grande extensão territorial, o presente estudo revelou como Cunha possui uma grande importância do ponto de vista ambiental para o estado de São Paulo, tanto no que se refere a questões relacionadas à mobilidade, hidrografia, florestas, entre outros. Nesse sentido, a segurança e monitoramento do município deve ser constante.

Apesar dos contatos com a Prefeitura e Defesa Civil de Cunha terem sido obtidos com êxito, observou-se que existe um grande conhecimento sobre as áreas o município, mas que essas informações não estão documentadas. Desta maneira, salienta-se a importância de se registrar pesquisas, mapas, dentre quaisquer outros tipos de informação acerca destes estudos, a fim de serem catalogados e servirem como referência para estudos futuros.

Portanto, seria de enorme valia para as instituições de ensino e pesquisa, bem como para o município de Cunha, a criação de um banco de dados de livre acesso que reunisse informações e dados georreferenciados das diversas temáticas do município, e que contassem com engajamento da Prefeitura, Defesa Civil, da população e de outras organizações. Uma vez que mais dados existam, é possível avançar na pesquisa e atualizá-la, representando com mais clareza e veracidade a realidade do município de Cunha, permitindo maior contato junto à comunidade e novas pesquisas acerca de diversas outras temáticas.

REFERÊNCIAS

- 4x4Brasil. **Fórum**. Cunha: estrada Cunha - Paraty, 2010. Disponível em: <https://www.4x4brasil.com.br/forum/trilhas/65580-estrada-cunha-paraty-2.html>. Acesso em: 24 abr. 2022.
- ANA. **A Bacia**. Hidrografia, [2011]. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sar/sin/b_paraiba-do-sul. Acesso em: 26 jul. 2021.
- ANTUNES, F. dos S. *et al.* Desenvolvimento de classes e unidades geo-pedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia. *In*: MARQUES, J. C. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**. Lisboa: Impactum, 2013. p. 61-79. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10604>. Acesso em: 26 jul. 2021.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. *In*: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. p. 243-269.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1992, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 1992.
- BARNES, S. L. **Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations**. Memo. Oklahoma: National Severe Storms Laboratory, 1973. *E-book*. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/17647>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996. 875 p.
- BISPO, C. de O. *et al.* Suscetibilidade induzida a escorregamentos, via aplicação do método AHP. **Diversitas Journal**, Arapiraca, v. 5, n. 1, p. 298-314, 2020.
- BRASIL. **Home**. Apresentação: Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil, 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 23 maio 2022.
- BRASIL. **Lei nº 6.766**, de 19 de dezembro de 1979: dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 1979. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm. Acesso em: 27 jul. 2021.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília, DF: Ministério das Cidades - Cities Alliance, 2006. Disponível em: http://planodiretor.mprs.mp.br/arquivos/prevencao_riscos.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Recuperação de matas ciliares junto a agricultores familiares da estância climática de Cunha – SP**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/8140-sp-cunha.html>. Acesso em: 24 abr. 2022.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações Florestais. **Definição de floresta**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações Florestais, 2019. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais/167-definicao-de-floresta>. Acesso em: 24 abr. 2022.

BRENNING, A. Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. **Natural Hazards and Earth System Science**, Alemanha, v. 15, p. 45-57, 2015.

CAMPOS, L. E. P. Utilização de parâmetros de solos não saturados em encostas. **Laboratório de Geotecnia - Universidade Federal da Bahia**, Salvador – BA, v. 58, p. 1-7, 2017. Disponível em: <http://www.geotecnia.ufba.br/arquivos/ST5-Tp03.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CANAVESI, V.; ALVALÁ, R. Changes in vegetation cover in reforested areas in the State of São Paulo, Brazil and the implication for landslide processes. **ISPRS - International Journal of Geo-Information**, Basel, v. 1, p. 209-227, 2012.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991. *E-book*.

CEMADEN. **Missão**. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2016. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/missao-do-cemaden/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CEMADEN. **Movimento de massa**. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, 2016. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/deslizamentos/#:~:text=Movimento%20de%20Massa%2C%20tamb%C3%A9m,potencializado%20pela%20a%C3%A7%C3%A3o%20da%20%C3%A1gua>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CHOU, S. C. *et al.* Evaluation of the eta nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Estados Unidos da América, v. 3, p. 438-454, 2014.

COHEN, J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, Nova Iorque, v. XX, p. 37-46, 1960.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, Estados Unidos da América, v. 37, p. 35-46, 1991.

CORTES, C.; VAPNIK, V. Support-vector networks. **Machine Learning**, Estados Unidos da América, v. 20, p. 273-297, 1995.

CPRM. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**: São Paulo. Serviço Geológico do Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres/Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes---Sao-Paulo-5088.html>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CPRM. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. Serviço Geológico do Brasil, 2006. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CPRM. **Informações para a gestão territorial**. Cobertura e uso da terra. Serviço Geológico do Brasil, 2005. Disponível em: https://cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/cat_gate.pdf. Acesso em: 24 abr. 2022.

CREPANI, E. M. *et al.* Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial. **INPE-8454-RPQ/722**, São José dos Campos, v. 1, p. 101, 2001.

CUNHA (Município). **Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (PMGIRS)**. Cunha, SP: Prefeitura Municipal de Cunha, 2018. Disponível em: <http://www.cunha.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-Municipal-Cunha.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CUTTER, S. L.; FINCH, C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Estados Unidos da América, v.7, n. 105, p. 2301-2306, 2008.

D'ORSI, R. N. **Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ (Rio-Teresópolis)**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/en/documents2/doutorado/2011-3/1030-ricardo-neiva-d-orsi-doutorado/file>. Acesso em: 01 mar. 2022.

DIAS, W. A.; THOMAZ, E. L. Avaliação dos efeitos do pastoreio sobre a erosão em margens de canal fluvial em sistema de faxinal. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 23, p. 23-35, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/sn/v23n1/03.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2021.

DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Stuttgart, v. 2, n. 80, p. 45-55, 1990.

DONATI, L.; TURRINI, M. C. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslide with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). **Engineering Geology**, China, v. 63, p. 277-289, 2002.

EFFGEN, J. F. **Análise da distribuição de áreas suscetíveis a movimentos de massa na Região Administrativa 1 de Vila Velha-ES**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Geografia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015. Disponível em: https://geografia.ufes.br/sites/geografia.ufes.br/files/field/anexo/tcc-bacharel-juliaeffgen_rev_final.compressed.pdf. Acesso em: 27 jul. 2021.

EMBRAPA. **Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1037806/levantamento-de-reconhecimento-de-baixa-intensidade-dos-solos-do-estado-do-rio-de-janeiro>. Acesso em: 24 abr. 2022.

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

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B (coord.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

FERRÃO, G. V. **Aplicação de métodos quantitativos de mapeamento de deslizamento de terra nas encostas de Vitória – ES**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2016.

FIORI, A. P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geografia**, Curitiba, v. 43, p. 7-24, 1995.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 550 p.

FONTOLAN, M. R. **Modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 no estudo de eventos extremos no estado de São Paulo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo, Campinas, 2019.

G1. Deslizamento de terra mata sete pessoas em Angra dos Reis:

4 estão desaparecidas. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2022/04/02/deslizamento-de-terra-atinge-casas-e-deixa-moradores-soterrados-em-angra-dos-reis.ghtml>. Acesso em: 24 abr. 2022.

GERZSENYI, D.; ALBERT, G. Landslide inventory validation and susceptibility mapping in the Gerecse Hills. **Geo-spatial Information Science**, Hungria, v. 24, p. 498-508, 2021.

GUERRA, A. J. T. *et al.* Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, p.35-43, 2007.

GUIMARÃES, R. F. *et al.* Movimentos de Massa. *In*: FLORENZANO, T. G. (coord.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. v. 1, p. 159-184.

GUIMARÃES, S. O. *et al.* Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 337-365, 2016.

GUTHRIE, R. H. The effects of logging on frequency and distribution of landslides in three watersheds on Vancouver Island, British Columbia. **Geomorphology**, Estados Unidos da América, v. 43, p. 273-292, 2002.

GUZZETTI, F. *et al.* Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Austria, v. 98, n. 2, p.239-267, 2007.

IBGE. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em: 26 jul. 2021.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE e CEMADEN, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 26 jul. 2021.

IBGE. **Cidades**. Rio de Janeiro, IBGE, 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/cunha/panorama>. Acesso em: 26 jul. 2021.

IBGE. **Malhas digitais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 24 abr. 2022.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2007.

IBGE. **Portal de mapas, rios e municípios**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa206426>. Acesso em: 24 abr. 2022.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. *In*: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (coord.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. p. 136-139.

IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. Reino Unido: contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel of climate change, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

IPT. **Vítimas de deslizamentos**. Levantamento do IPT de mortes causadas por deslizamentos. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2017. Disponível em: https://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1190. Acesso em: 27 jul. 2021.

JAAFARI, A. *et al.* GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. **International journal of Environmental Science and Technology**, Teerã, v. 11, p. 909-926, 2014.

JIMÉNEZ-LÓPEZ, A. F. *et al.* Análisis multiespectral de la vegetación para aplicaciones de sensado remoto: multispectral analysis of vegetation for remote sensing applications. **Iteckne**, Bucaramanga, v. 12, n. 2, p.12-20, dez. 2015.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, Reino Unido, v. 33, p. 159-174, 1997.

LARSEN, M. C.; TORRES-SÁNCHEZ, A. J. The frequency and distribution of recent landslide in three montane tropical regions of Puerto Rico. **Geomorphology**, Estados Unidos da América, v. 24, n. 4, p. 309-331, 1998.

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

LIMA, R. L. **Avaliação do algoritmo SVM na detecção de comportamentos suspeitos em cenas de vídeo**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

LOPES, E. S. S.; NAMIKAWA, L. M.; REIS, J. B. C. Risco de escorregamentos: Monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis - Rio de Janeiro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 13., 2011, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, SP: ABGE, 2011.

LOPES, J. A. U. **Os movimentos coletivos dos solos e a evolução das encostas naturais nas regiões tropicais e subtropicais úmidas**. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

MARCELINO, E. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2004. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2004.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, China, v. 29, p. 2241-2255, 2015.

MARQUES, J. A. P. **Estudo de metodologia de avaliação de risco a escorregamento de terra em área urbana: o caso do município de Juiz de Fora – MG**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MEYER, D. **Support vector machines**. Viena: FH Technikum Wien, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/e1071/vignettes/svmdoc.pdf>. Acesso em: 27 maio 2022.

MENDES, R. *et al.* Estudo de limiares críticos de chuva deflagradores de deslizamentos no Município de São José dos Campos/SP (Brasil). **Territorium**, Coimbra – PT, v. 22, p. 119-129. Disponível em: <https://digitalis-dsp.uc.pt/bitstream/10316.2/38061/1/Estudo%20de%20limiares%20criticos.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2022.

MHE. **Banco de dados**. Rio Claro: Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2000. Disponível em: <https://museuhe.com.br/banco-de-dados/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

MICROSOFT EXCEL. **Versão 2019**. Estados Unidos da América: Microsoft 365[®], 2019. Disponível em: <https://www.microsoft.com/>. Acesso em: 23 maio 2022.

MONTANDON, L. F. **Avaliação da influência da escala do mapa litológico nos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, no município de Caeté (MG), utilizando métodos estatísticos**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2017.

MONTGOMERY, C. W. **Environmental geology**. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers, 1992. 465 p.

MOSER, C. **The asset vulnerability framework: reassessing urban poverty reduction strategies**. Reino Unido: World Development, v. 26, 1998.

MOURA, I. F. M. S. **Simulação e avaliação de incisões cirúrgicas com realidade virtual**. 2017. Dissertação (Mestrado em Modelos de Decisão e Saúde) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

NETO, M. R. A. **Levantamento e caracterização do meio físico para elaboração da compartimentação geomorfológica e subsídio para o planejamento ambiental para o município de Cunha**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

PACHECO, T. C. K. F.; KUX, H. J. H.; MENDES, R. M. Identificação de áreas de suscetibilidade a escorregamentos de encosta utilizando o modelo matemático Shalstab. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 37, p. 228-243, 2020.

PALADINO, G. **Reportagens**. Geólogos explicam desabamento de cânion em Capitólio e veem Brasil atrasado em avaliações de segurança de áreas turísticas. São Paulo: Jornal da UNESP, 2022. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2022/01/14/geologos-explicam-desabamento-de-canon-em-capitolio-e-veem-brasil-atrasado-no-monitoramento-de-seguranca-de-areas-turisticas/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

PARANÁ (Estado). **Paraná: neossolo**. Curitiba, PR: Secretaria de Educação do Estado do Paraná, 2013. Disponível em: <http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=1544&evento=7%3E>. Acesso em: 24 abr. 2022.

PBMC. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional: impactos, vulnerabilidade e adaptação. **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**, Brasília, v. 2, p. 1-11, 2016.

PECC. **A cidade**. Cunha – SP: Prefeitura da Estância Climática de Cunha, 2019. Disponível em: <http://www.cunha.sp.gov.br/a-cidade/>. Acesso em: 10 jul. 2021.

PEIXOTO, I. **Blog**. [São Paulo]: Movimentos de massa: tombamento de blocos, rastejos – Igeológico, 2022. Disponível em: <http://igeologico.com.br/processos-de-dinamica-superficial-movimentos-de-massa/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

PEREZ, L. P. *et al.* Mudanças climáticas e desastres: análise das desigualdades regionais no Brasil. **Sustainability in Debate**, v. 11, n. 3, p. 278-296, 2020.

PINHO, G.; FRANCISCO, C.; SALGADO, C. Análise espacial dos movimentos de massa ocorridos em 2011 no bairro do Córrego D'Antas – Nova Friburgo/RJ. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: São Gonçalo, 2012. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/download/5355/5197>. Acesso em: 21 jul. 2021.

PMSJC/PMRR. **Avaliação de Áreas de Risco do Município de São José dos Campos.** Cunha – SP: Prefeitura Municipal de São José dos Campos/Plano Municipal de Redução de Risco, 2017. Disponível em: <https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/gestao-habitacional-e-obras/habitacao/plano-municipal-de-reducao-de-riscos/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento emoto no Estudo da Vegetação.** São José dos Campos: Parêntese, 2010. 128 p.

PRIETO, C. C. *et al.* Comparação entre a aplicação do modelo SHALSTAB com mapas de suscetibilidade e risco de deslizamentos na Bacia do Córrego Piracuama em Campos do Jordão - SP. **Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia**, v. 69, p.71-87, 2017.

QGIS. **User Guide.** Estados Unidos da América: Análise Espacial – Interpolação, 2016. Disponível em: https://docs.qgis.org/2.8/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html. Acesso em: 24 abr. 2022.

RAPHAEL, L. Análise de movimentos de massa no córrego Dantas, Nova Friburgo (RJ). *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA*, 9., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://docplayer.com.br/62813646-Analise-de-movimentos-de-massa-no-corrego-dantas-nova-friburgo-rj.html>. Acesso em: 8 jun. 2022.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 27 maio 2022.

RECKZIEGEL, B. W. **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005.** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RICKLI, C.; GRAF, F. Effects of forests on shallow landslides: case studies in Switzerland. **Forest snow and landscape research**, Birmensdorf, v. 82, p. 33-44, 2009.

RODRIGUES, C. de S. **Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo - RJ por meio de inferência fuzzy e elaboração de cenários de alerta com uso do TerraMA2.** 2013. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

ROSA FILHO, A.; CORTEZ, A. T. C. Problemática socioambiental da ocupação urbana em áreas de risco de deslizamento da “Suiça Brasileira”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 33-40, 2010.

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

ROZANTE, J. R. *et al.* Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. **Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos>. Acesso em 24 abr. 2022.

SANTOS, R. F. dos. **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 2007. 196 p.

SARKAR, S.; KANUNGO, D. P. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Estados Unidos da América, v. 70, n. 5, p. 617-625, 2004.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015, 288 p.

SEADE. **Perfil dos municípios paulistas**. Brasília: Fundação Seade, 2019. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and process**. Oxford: Oxford University Press, 1982. 264 p.

SEPÚLVEDA, S. A.; PETLEY, D. N. Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 15, p. 1821-1833, 2015.

SILVA, L. T. **Vulnerabilidade ao escorregamento de terras: estudo de caso: Bacia do Rio Bengalas**, 2011. 2014. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) - Universidade de Évora, Évora - PT, 2014.

SILVA, M. A. **Aplicação de lógica nebulosa para previsão do risco de escorregamentos de taludes em solo residual**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Brasil, v. 21, n. 2, p. 416 – 428, 2016.

SILVEIRA, H. L. F. da; VETTORAZZI, C. A.; VALENTE, R. A. Avaliação multicriterial no mapeamento da suscetibilidade de deslizamentos de terra. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 973-982, 2014.

SOARES, A. T. de M. **Mapeamento geológico, análise estrutural e metamorfismo nas proximidades de Campos de Cunha, São Paulo**. 2018. Trabalho de Graduação (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SOETERS R., VAN WESTEN C. J. Slope instability recognition, analysis and zonation. *In*: TURNER A. K.; SCHUSTER R. L. **Landslides, investigation and mitigation**. Washington D.C: National Academy Press, 1996. v. 1, p. 129-177.

TATIZANA, C. *et al.* Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos aplicados às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987a, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2008.

TATIZANA, C. *et al.* Modelamento numérico de análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987b, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 1987.

TERRA. **Cidades**: mortes por causa da chuva em São Paulo chegam a 10. São Paulo: Terra Networks Brasil S. A., 2010. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/mortes-por-cao-da-chuva-em-sao-paulo-chegam-a-10,d418a21a4572b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em: 26 jul. 2020.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

TONIAZZO, F. *et al.* Escorregamento de solos na região oeste do Estado de Santa Catarina: Consequências sócio-ambientais. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 1, n. 7, p. 397-417, 2018.

UOL. **Petrópolis**: chega a 231 o número de mortes por chuvas; há 5 desaparecidos. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2022/02/28/petropolis-sobe-para-231-o-numero-de-mortos-por-chuvas-ha-5-desaparecidos.htm>. Acesso em: 24 abr. 2022.

VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p.

WINGE, M. **Petrologia metamórfica**. Brasília: Universidade de Brasília, 1996. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/textos/met1/index.htm#Class>. Acesso em: 13 out. 2019.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Escorregamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, Rio de Janeiro, v. 12, p. 27-36, 1989.

ZÊZERE, J. L. *et al.* Landslide in the North of Lisbon Region (Portugal): conditioning and triggering factors. **Physics and Chemistry of the Earth, Part A: solid earth and geodesy**, Reino Unido, v. 24, n. 10, p. 925-934, 1999.