



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE
E DE VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO
MUNICÍPIO DE CUNHA – SP, UTILIZANDO MODELAGENS
MATEMÁTICAS ASSOCIADAS A PROJEÇÕES CLIMÁTICAS
ETA-HADGEM-ES RCP 4.5 PARA O PERÍODO DE 2022 A 2040**

Irving Rodrigues de Souza

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientada pelo
Dr. Jean Pierre Henry Balbaud
Ometto e coorientada pelo Dr.
Paulo Valladares Soares.

INPE
Cachoeira Paulista
2022



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE ÁREAS DE SUSCETIBILIDADE
E DE VULNERABILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA NO
MUNICÍPIO DE CUNHA – SP, UTILIZANDO MODELAGENS
MATEMÁTICAS ASSOCIADAS A PROJEÇÕES CLIMÁTICAS
ETA-HADGEM-ES RCP 4.5 PARA O PERÍODO DE 2022 A 2040**

Irving Rodrigues de Souza

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientada pelo
Dr. Jean Pierre Henry Balbaud
Ometto e coorientada pelo Dr.
Paulo Valladares Soares.

INPE
Cachoeira Paulista
2022

RESUMO

O município de Cunha, situado no Estado de São Paulo, possui uma extensão territorial de 1.407,25 km², sendo uma importante área de conservação ambiental. O município tem sofrido alterações no seu uso e ocupação do solo, onde 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 tem como objetivo 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 2022 a 2040. Através do banco de imagens de satélites disponibilizados pelo *Google Earth*, foram obtidos 800 pontos de cicatrizes ocorridos no dia 01/01/2010, dia do citado evento que culminaram nas fatalidades. Assim, por intermédio 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 confeccionados. Através das cicatrizes levantadas do município foram calculados os pesos para cada classe das variáveis, com valores variando 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, onde o índice para que ocorra tais movimentos de massa refere-se a 0,70. 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 efeito 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. Por fim, segundo as projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, para os eventos de precipitação, identificou-se que 70 outras datas com eventos extremos podem ocorrer, acarretando deslizamentos de terra no período de 2022 a 2040. Entende-se, portanto, que os resultados obtidos são de extrema importância para a comunidade e poder público locais, a fim de auxiliar na construção de ferramentas e políticas no planejamento urbano e combate as 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 1,407.25 km² as a territorial extension, being an important area of environmental conservation. The municipality has changes in its land use and occupation in 2010, which 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 2022 to 2040. Through the satellite image bank made available by Google Earth, 800 points of scars occurred on 01/01/2010, the day of the aforementioned event that culminated in fatalities. 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, where the index for such mass movements to occur refers to 0,70. 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 effect 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. Finally, according to climate projections Eta-HadGEM-ES RCP 4.5, for precipitation events, it was identified that 70 other days with extreme events may occur, causing landslides between the period 2022 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 the creation of policies 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 FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Cunha/SP.....	5
Figura 2 - Mapa pedológico do município de Cunha/SP	16
Figura 3 - Mapa litológico do município de Cunha/SP.....	18
Figura 4 - Mapa de uso e cobertura do solo do município de Cunha/SP em 2011	21
Figura 5 - Mapa de declividade do município de Cunha/SP.....	23
Figura 6 - Mapa de curvatura horizontal do município de Cunha/SP	25
Figura 7 - Mapa de curvatura vertical do município de Cunha/SP	26
Figura 8 – Mapa de distância da malha viária do município de Cunha/SP	28
Figura 9 - Suscetibilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha/SP para 2011	32
Figura 10 – Mapa de precipitação diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	35
Figura 11 – Mapa de precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	36
Figura 12 – Mapa de máxima precipitação acumulada de 5 dias diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	37
Figura 13 – Mapa do coeficiente de precipitação crítica do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010).....	38
Figura 14 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha (01/01/2010)	40
Figura 15 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha – 20,00 % mais críticos (01/01/2010).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparação das variáveis da suscetibilidade a deslizamentos de terra	10
Tabela 2 – Classificação dos índices de suscetibilidade a deslizamentos de terra	13
Tabela 3 - Matriz de Confusão para a variável “Uso e Cobertura do Solo” do município de Cunha/SP para 2011.....	19
Tabela 4 - Acurácia do Produtor (AP) para as classes de UCS de Cunha/SP no ano de 2011	20
Tabela 5 - Acurácia do Usuário (AU) para as classes de UCS de Cunha/SP no ano de 2011	20
Tabela 6 - Classes para a variável “Pedologia” do município de Cunha/SP para 2011	29
Tabela 7 - Classes para a variável “Litologia” do município de Cunha/SP para 2011	29
Tabela 8 - Classes para a variável “Uso e Cobertura do Solo” do município de Cunha/SP para 2011	30
Tabela 9 - Classes para a variável “Declividade” do município de Cunha/SP para 2011	30
Tabela 10 - Classes para a variável “Curvatura Horizontal” do município de Cunha/SP para 2011.....	30
Tabela 11 - Classes para a variável “Curvatura Vertical” do município de Cunha/SP para 2011.....	31
Tabela 12 - Classes para a variável “Distância da malha viária” do município de Cunha/SP para 2011.....	31
Tabela 13 - Índices de Suscetibilidade das 800 cicatrizes para cada classe de variável ambiental do município de Cunha/SP para 2011	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Desastres Naturais.....	1
1.2 O município de Cunha/SP	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2. CARACTERIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO PARA ESTUDAR O MUNICÍPIO DE CUNHA/SP.....	5
3. METODOLOGIA	7
4. RESULTADOS.....	14
4.1 Pedologia	14
4.2 Litologia	17
4.3 Uso e cobertura do solo	19
4.4 Declividade.....	22
4.5 Curvaturas horizontal e vertical	24
4.6 Distância da malha viária	27
4.7 Pesos das classes das variáveis.....	29
4.8 Suscetibilidade a deslizamentos de terra	31
4.9 Mapas climáticos de Cunha	34
4.10 Vulnerabilidade a deslizamentos de terra.....	39
4.11 Projeções climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5 – ocorrência de novos eventos entre 2022 e 2040.....	44
4.12 Demais resultados obtidos durante a pesquisa.....	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 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 têm apresentado recorrência e impactos cada vez maiores atualmente, 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 e a precária organização nas ocupações urbanas, 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 as Nações Unidas, a voltarem esforços para a prevenção e redução dos desastres naturais (RECKZIEGEL, 2007).

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). Segundo o Instituto de Pesquisas



Tecnológicas (IPT, 2017), 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.

No Brasil, os tipos de desastres mais recorrentes são as inundações e os escorregamentos, com 61,8% e 15% dos registros, respectivamente (RODRIGUES, 2013). Em países de elevada urbanização e com elevada desigualdade social, as alternativas habitacionais de populações de baixa renda tem se reduzido, restando a ocupação em locais desfavoráveis e mais suscetíveis a desastres naturais, como áreas ambientalmente inadequadas, ausentes de planejamento urbano e infraestrutura (ROSA FILHO, 2010).

Verifica-se atualmente ainda, um aumento na frequência e na intensidade de eventos de chuva devido às mudanças climáticas (CORDERO et al., 2009). O Documento do Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República do Brasil (NAE) revela que países em desenvolvimento como o Brasil encontram-se mais vulneráveis à mudança do clima, por terem historicamente uma menor capacidade de responder a sua variabilidade natural (NAE, 2005).

Assim, as populações desses locais estão mais expostas aos perigos decorrentes dos extremos climáticos, tanto pela fragilidade de suas habitações, como pela dificuldade de reação ao meio (HOGAN, 2009 apud SILVA, 2014).

1.2 O município de Cunha/SP

Um exemplo de localidade com grande ocorrência de desastres naturais é o município de Cunha, situado no Estado de São Paulo. Embora o município tenha extrema relevância ambiental, abrigando nascentes e grandes áreas de Bacias Hidrográficas (ANA, 2019), Cunha tem mudado significativamente a sua ocupação, acarretando problemas ambientais em seu território.

Segundo a publicação “População em áreas de risco no Brasil”, divulgada pelo IBGE e CEMADEN (2018), 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).



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, 2014). Assim, destaca-se recentemente a utilização de tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na identificação dessas áreas, que permitem a integração de dados, como: tipo de solo, topografia, uso e ocupação do solo, entre outros, auxiliando na elaboração de prognósticos mais confiáveis da área de estudo (BISPO et al., 2011 apud TEIXEIRA, 2019).

Portanto, neste contexto de mudanças climáticas e na função da ciência como ícone essencial para a redução de desastres naturais, este Projeto tem objetivado identificar, do ponto de vista ambiental, as principais áreas urbanas e rurais suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra do município de Cunha, tal como projetar eventos de precipitação no município para o período de 2022 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.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este projeto de Iniciação Científica tem como objetivo principal a Identificação e análise de áreas de suscetibilidade e de vulnerabilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha - SP, com projeções climáticas Eta-HadGEM-ES RCP 4.5 para o período de 01/01/2022 a 30/12/2040.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este projeto tem como objetivos específicos, conforme previsto originalmente no cronograma a:



ETAPA 1: (agosto de 2019 a agosto de 2020)

- a) Criação de arquivos em formato vetorial “*Shapefile*” das variáveis ambientais pedologia e litologia; e em formato matricial “*Raster*”, uso e cobertura do solo, declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical do município de Cunha/SP. Para tanto, serão utilizadas dados georreferenciados e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), através do *software* ArcGIS®;

ETAPA 2: (setembro de 2020 a agosto de 2021)

- b) Conversão dos arquivos das variáveis ambientais em formato “*Shapefile*” para o formato “*Raster*” pelo *software* ArcGIS® permitindo o uso da função álgebra de mapas;
- c) Aplicação dos índices de suscetibilidade a deslizamentos de terra desenvolvidos por SILVA (2014), às áreas do município de Cunha relacionadas às suas variáveis ambientais citadas;
- d) Geração do mapa de suscetibilidade do município de Cunha a deslizamentos de terra, a partir de ferramentas do *software* ArcGIS® na função álgebra de mapas;
- e) Análise das áreas do município de Cunha suscetíveis a deslizamentos de terra, classificando-as segundo as categorias: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta;

ETAPA 3: (setembro de 2021 a agosto de 2022)

- f) Levantamento e análise de dados meteorológicos do município de Cunha desde 01/01/2000;
- g) Geração do mapa de vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha, a partir de ferramentas do *software* ArcGIS® na função álgebra de mapas, utilizando os dados de suscetibilidade e meteorológicos da área de estudo;
- h) Análise das áreas do município de Cunha vulneráveis a deslizamentos de terra, classificando-as segundo as categorias: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta;

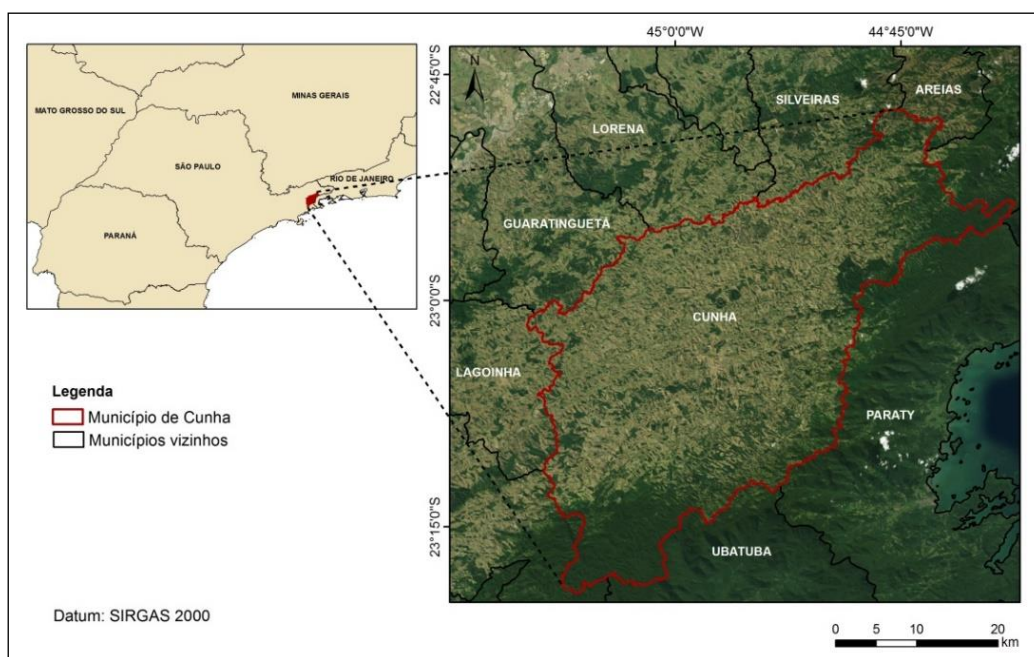


- i) Projeção de eventos de deslizamento de terra no município de Cunha através do modelo regional Eta HadGEM-ES RCP 4.5, para o período de 01/01/2022 a 30/12/2040; e
- j) Submissões/publicações de artigos em periódicos (jornais, revistas e livros científicos) nacionais e internacionais.

2. CARACTERIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO PARA ESTUDAR O MUNICÍPIO DE CUNHA/SP

O município de Cunha, situado no Estado de São Paulo, tem uma extensão territorial de 1.407,25 km² (SEADE, 2019), com uma altitude média de 1.100 metros, atingindo os 1.840 metros, como é o caso do Pico da Pedra da Macela. 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). 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 (Figura 1).

Figura 1 - Localização do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria (2019).



As terras do município de Cunha abrigam as nascentes do rio Jacuí e Paraibuna, e grandes áreas da Bacia Hidrográfica do rio Paraitinga, formadores da grande Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, que abrange 03 UFs 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 (MMA, 2005).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - 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 janeiro de 2010 fortes chuvas atingiram o Vale do Paraíba, preponderantes para que no município de Cunha ocorressem diversos deslizamentos de terra, levando à morte de seis pessoas soterradas (TERRA, 2010).

Portanto, devido ao alto índice ainda de moradias situadas em áreas de risco, o município de Cunha se torna uma importante área de estudo, visando a previsão destes eventos e posterior prevenção de novos impactos.



3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos realizados neste ano de Projeto são referentes ao cumprimento da última etapa, a “ETAPA 3”, descrita na Seção 2, onde o mapa temático final de vulnerabilidade a deslizamentos de terra foi elaborado com o auxílio do *software* de geoprocessamento ArcGIS® 10.8. Além disto, foram projetados os valores de precipitação para o período de 01/01/2022 a 30/12/2040 através do modelo regional de mudanças climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5, desenvolvido pelo INPE.

Contudo, previamente a esta etapa, foi realizada uma revisita as “ETAPA 1” e “ETAPA 2” do presente Projeto. Referente a primeira etapa e mediante considerações levantadas pelos avaliadores do Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do INPE de 2020 - SICINPE, os mapas temáticos georreferenciados das 6 variáveis ambientais pertencentes à modelagem desenvolvida por Silva (2014) a ser aplicada ao município de Cunha/SP foram refeitos.

Os dados da variável ambiental “Pedologia” foram extraídos do mapa pedológico do Estado de São Paulo, desenvolvido por Rossi (2017). Quanto a “Litologia”, os dados foram extraídos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, de 2004. A variável declividade é oriunda do Modelo Digital de Elevação - MDE do projeto TOPODATA/INPE (2008), e as variáveis “Curvatura Horizontal” e Curvatura Vertical” também obtidas pelo TOPODATA/INPE. A curvatura horizontal, entendida como a derivada de segunda ordem das curvas de nível de uma determinada vertente (VALERIANO, 2008), foi calculada respeitando as recomendações de Valeriano, onde o esquema de 5 classes é estabelecido com a faixa de $\pm 0,054^\circ/m$ para terrenos planares. A curvatura vertical, por sua vez, é descrita como a variação da declividade ao longo de uma determinada distância, ou como a segunda derivada da altitude (VALERIANO, 2008). Esta também foi calculada respeitando as recomendações de Valeriano (2008), com o esquema de 5 classes estabelecido na faixa de admissão de $\pm 0,00125^\circ/m$ para a classe retilínea.



Os dados da variável “Uso e Cobertura do Solo” foram gerados a partir de imagem do satélite LANDSAT-5, 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), e posteriormente do cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI, foi realizada uma classificação supervisionada, onde através do algoritmo de otimização *Support Vector Machine* - SVM, no ambiente do software R, obteve-se as classes de tal variável.

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 “Pedologia” e “Litologia” foram reprojctadas 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 cumprimento da “ETAPA 2” do Projeto, a princípio estava previsto a utilização da modelagem desenvolvida por Silva (2014) para o cálculo da suscetibilidade a deslizamentos de terra, conforme a “Equação 1” a seguir.

$$S = \left(\frac{\sqrt{Vdc} + \sqrt{Vpd} + \sqrt{Vli} + \sqrt{Vus} + \sqrt{Vcv} + \sqrt{Vch}}{NVA} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

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
- NVA = Número de Variáveis (6)

A modelagem de Silva (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, sendo que os resultados obtidos se mostraram eficientes na investigação deste tipo de movimento de massa.

Entretanto, para o município de Cunha, 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. 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 2:

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

(Equação 2)

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



Para a definição dos pesos de cada variável, foi utilizada 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 obter a menor diferença entre o maior valor de suscetibilidade e do menor valor dentre as 800 cicatrizes, a fim de melhor balizamento entre os valores, o melhor resultado obtido desta análise é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de comparação das variáveis da suscetibilidade a deslizamentos de terra

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

Fonte: Autoria própria.

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.

Para realizar 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 a setembro de 2011, inclusive com registro de 6 óbitos (TERRA, 2010). Portanto, 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.

Através dos 800 pontos de cicatrizes distribuídos no município, foram calculados proporcionalmente os pesos para cada classe das variáveis ambientais, 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.

Após a atribuição dos respectivos pesos para cada classe de variável, a Equação 2 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 2 e o mapa temático final foi gerado.

Iniciando o previsto na “ETAPA 3”, elaborou-se os mapas de PD, PA5, CPC e MAXPA5, 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 0,1º 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 você 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. Com isso, foi possível se obter os dados para cada variável de precipitação, conforme já citado.

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

Com a obtenção dos dados de precipitação, 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 (2014) e apresentada conforme equação a seguir:

$$V = \frac{\overbrace{S}^{\text{1º Termo}} + \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{PD}{CPC} \right) + \left(\frac{PA5}{MAXPA5} \right)}{2} \right]}}{2} \quad \left. \vphantom{\frac{S + \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{PD}{CPC} \right) + \left(\frac{PA5}{MAXPA5} \right)}{2} \right]}}{2}} \right\} \text{2º Termo} \quad \text{(Equação 3)}$$

Após a geração dos índices finais, os mesmos também foram reclassificados, através da ferramenta “*Reclassify*” de acordo com as classes apresentadas na Tabela 2 e o mapa temático final foi gerado.

Tabela 2 – 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 (2014) e modificados pelo Autor.

Por fim, fechando a 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.

Foram projetados os valores de precipitação para o período de 01/01/2022 a 30/12/2040 através do modelo regional de mudanças climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5, desenvolvido pelo INPE. Os valores advindos dessa simulação representaram os novos valores de precipitação que foram novamente utilizados no 2º termo matemático da Equação 3.

Diferentemente do que ocorre com os dados do MERGE, os dados de projeção climáticas possuem resolução espacial ainda maior. Com isso, a precipitação



diária para o município teve que ser considerada como distribuída igualmente em toda sua extensão. Além disto, o valor de CPC adotado foi o mínimo dentre o intervalo estabelecido (no caso, 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 todas as datas entre 2022 e 2040 onde a PA5 ultrapassou o limiar de deslizamentos, e com o maior valor de suscetibilidade obtido calculou-se a vulnerabilidade novamente, conforme já apresentada na Equação 3. O cálculo foi realizado através de planilha em Excel, com os dados obtidos das projeções e os extraídos do ArcGIS®.

Segundo Silva (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.

4. RESULTADOS

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 de todas as variáveis; no segundo serão discutidos os pesos dados às variáveis 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 possíveis novos eventos extremos e de deslizamentos para o período de 2022 a 2040.

4.1 Pedologia

A Figura 2 apresenta os tipos de solo do município de Cunha. Observa-se que a tipagem preponderante trata-se dos Cambissolos, com 78,45% da área



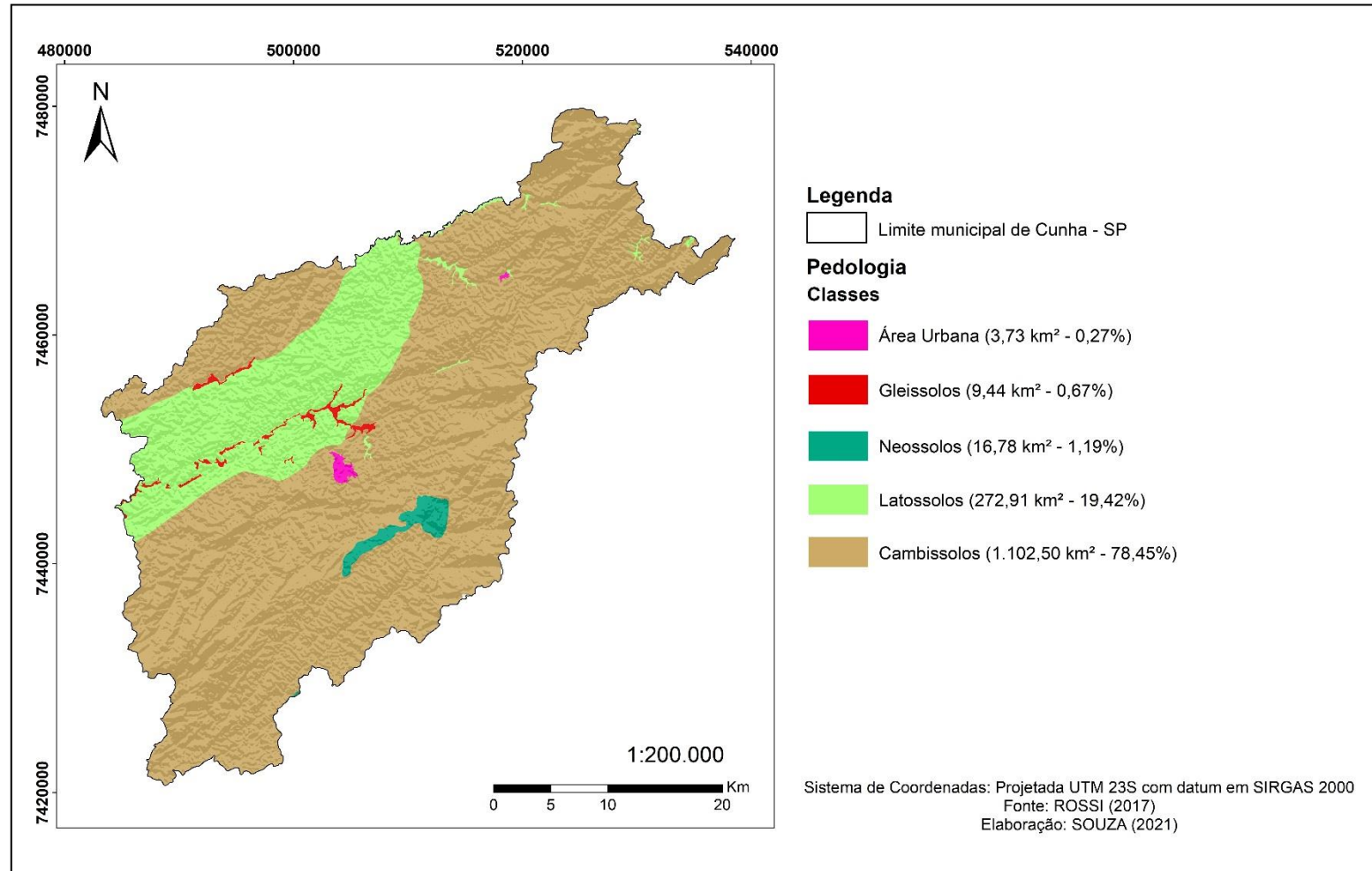
municipal, representando 1.102,50 km². Os Cambissolos ocorrem disseminados em todas as regiões do Brasil, muito encontrados em regiões serranas ou montanhosas (IBGE, 2007). Estes tipos de solos são compostos por material mineral de baixo gradiente textural entre seus horizontes, sendo pouco desenvolvidos 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 classe preponderante é a dos Latossolos, com 19,42%, o que equivale 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 quase 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 (BRASIL, 2013).



Figura 2 - Mapa pedológico do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria, dados provenientes de Rossi (2017).



4.2 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).

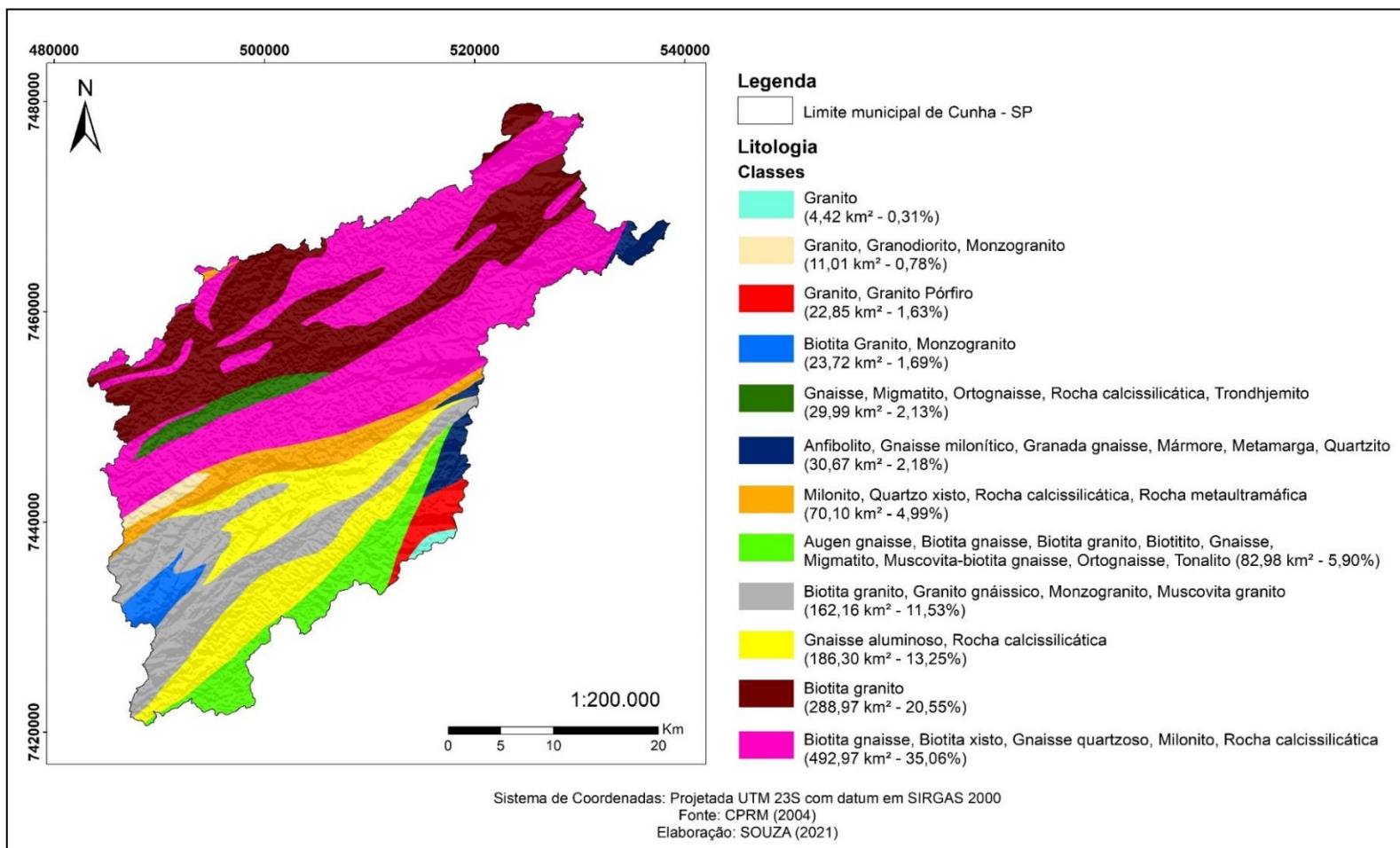
As unidades geológicas que afloram em parcelas da região de Cunha pertencem ao Terreno Embu. Essa entidade tectônica é constituída por rochas metamórficas e ígneas, em sua maioria com idades proterozoicas (SOARES, 2018). Devido essa vasta e complexa composição geológica, existem muitas classes litológicas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

A classe de Biotita gnaiss, 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 gnaiss 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 (2000), 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.

A Figura 3 apresenta, portanto, as classes observadas no município de Cunha, no que se refere a litologia.



Figura 3 - Mapa litológico do município de Cunha/SP



Fonte: Autoria própria, dados provenientes de CPRM (2004).



4.3 Uso e cobertura do solo

Para a confecção do mapa da variável ambiental “uso e cobertura do solo”, como já mencionado, foi realizada uma classificação supervisionada, através do algoritmo de otimização *Support Vector Machine - SVM*, no ambiente do *software R*. 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 matriz de confusão, por sua vez, indica uma visão tabulada da acurácia do mapa de classificação e permite o cálculo de medidas específicas tais como a acurácia global, acurácia do usuário e acurácia do produtor (CONGALTON, 1991). A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para a matriz de confusão do uso e cobertura de Cunha.

Tabela 3 - Matriz de Confusão para a variável “Uso e Cobertura do Solo” do município de Cunha/SP para 2011

Classes	Afloramento Rochoso	Água	Eucalipto	Floresta	Pastagem e/ou Agricultura	Solo Exposto	Área Construída
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.

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 de avaliação como forma de medir o desempenho em relação à



quantidade de casos corretamente avaliados (COHEN, 1960 apud MOURA, 2016). Desta maneira, o valor obtido para o presente estudo foi de 98,13%.

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 4 e 5 indicam tais valores para cada variável ambiental.

Tabela 4 - Acurácia do Produtor (AP) para as classes de UCS de Cunha/SP 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.

Tabela 5 - Acurácia do Usuário (AU) para as classes de UCS de Cunha/SP 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

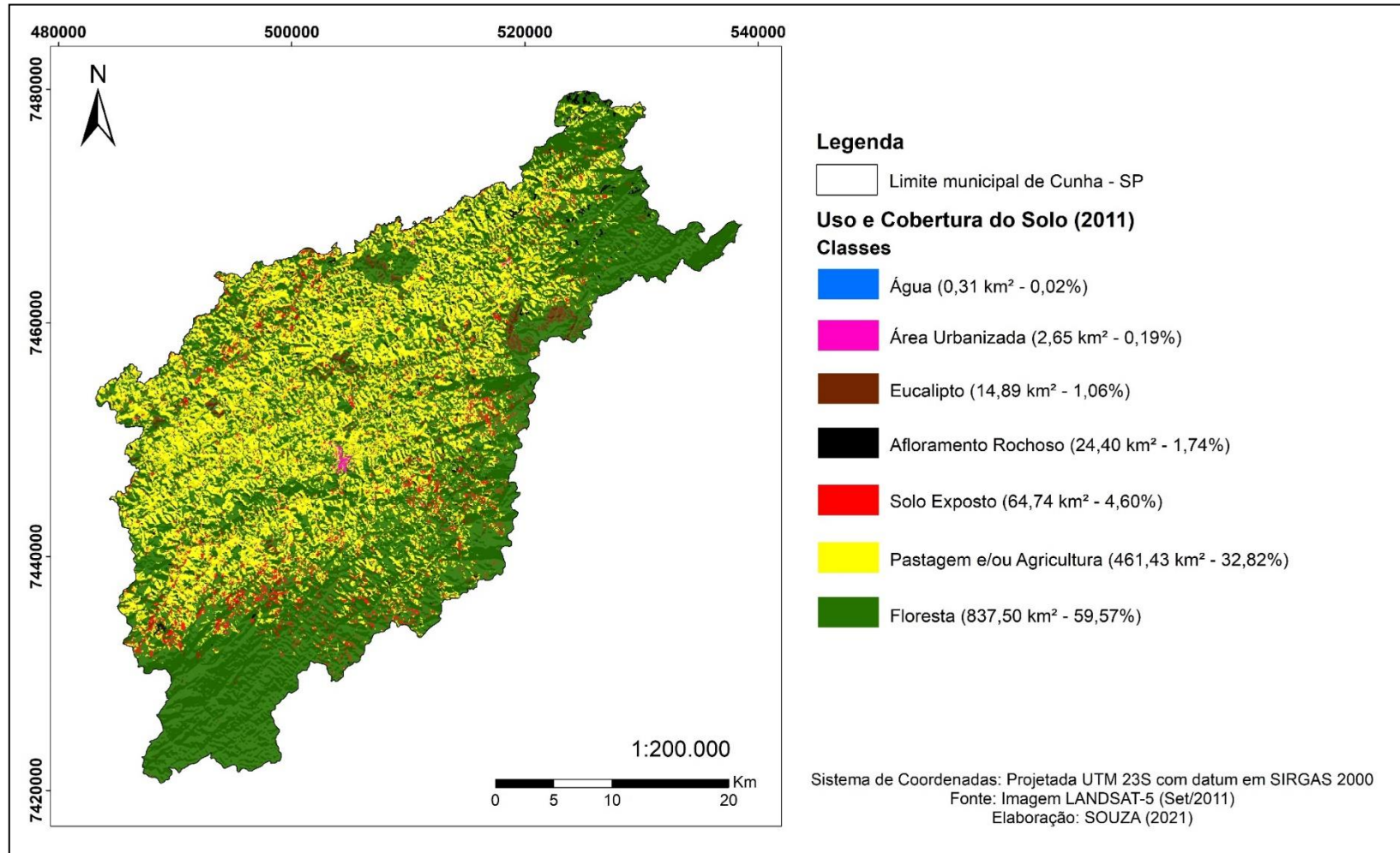
Fonte: Autoria própria.

A 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.

Por fim, a Figura 4 apresenta o mapa temático final da variável ambiental “Uso e cobertura do solo”.



Figura 4 - Mapa de uso e cobertura do solo do município de Cunha/SP em 2011



Fonte: Autoria própria, imagem proveniente de LANDSAT-5 de Set/2011 (2021).



4.4 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 5 refere-se a esta variável ambiental e revela que a maioria 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%).

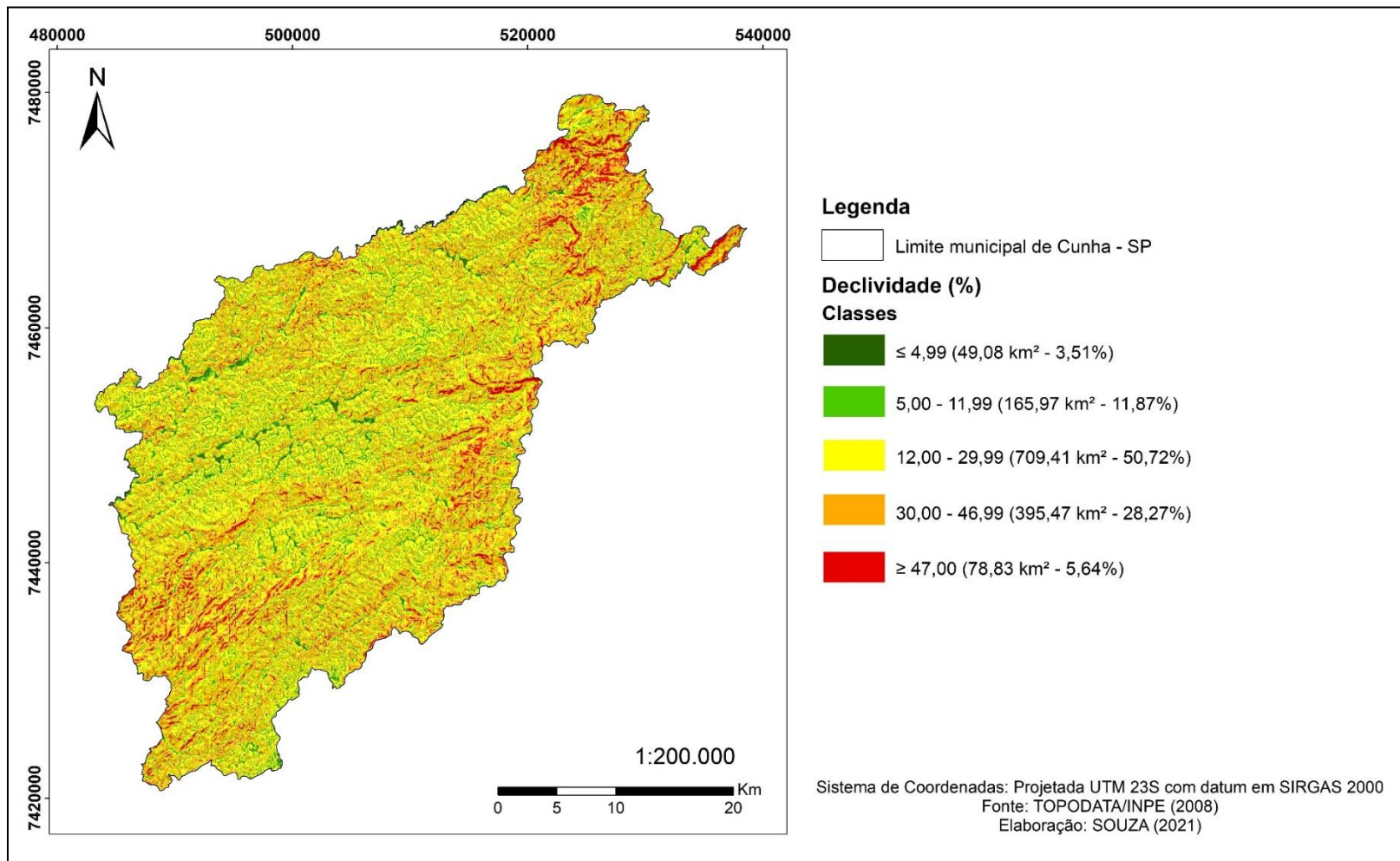
Ressalta-se que a Lei Federal nº 6.766/1979 não permite a ocupação em terrenos com declividade igual ou superior a 30%, salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes (BRASIL, 1979). Já as áreas com declividade superior a 47% não devem ser ocupadas tanto em meio urbano quanto rural (PRIETO; MENDES; NOBRE, 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 5 - Mapa de declividade do município de Cunha/SP



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



4.5 Curvaturas horizontal e vertical

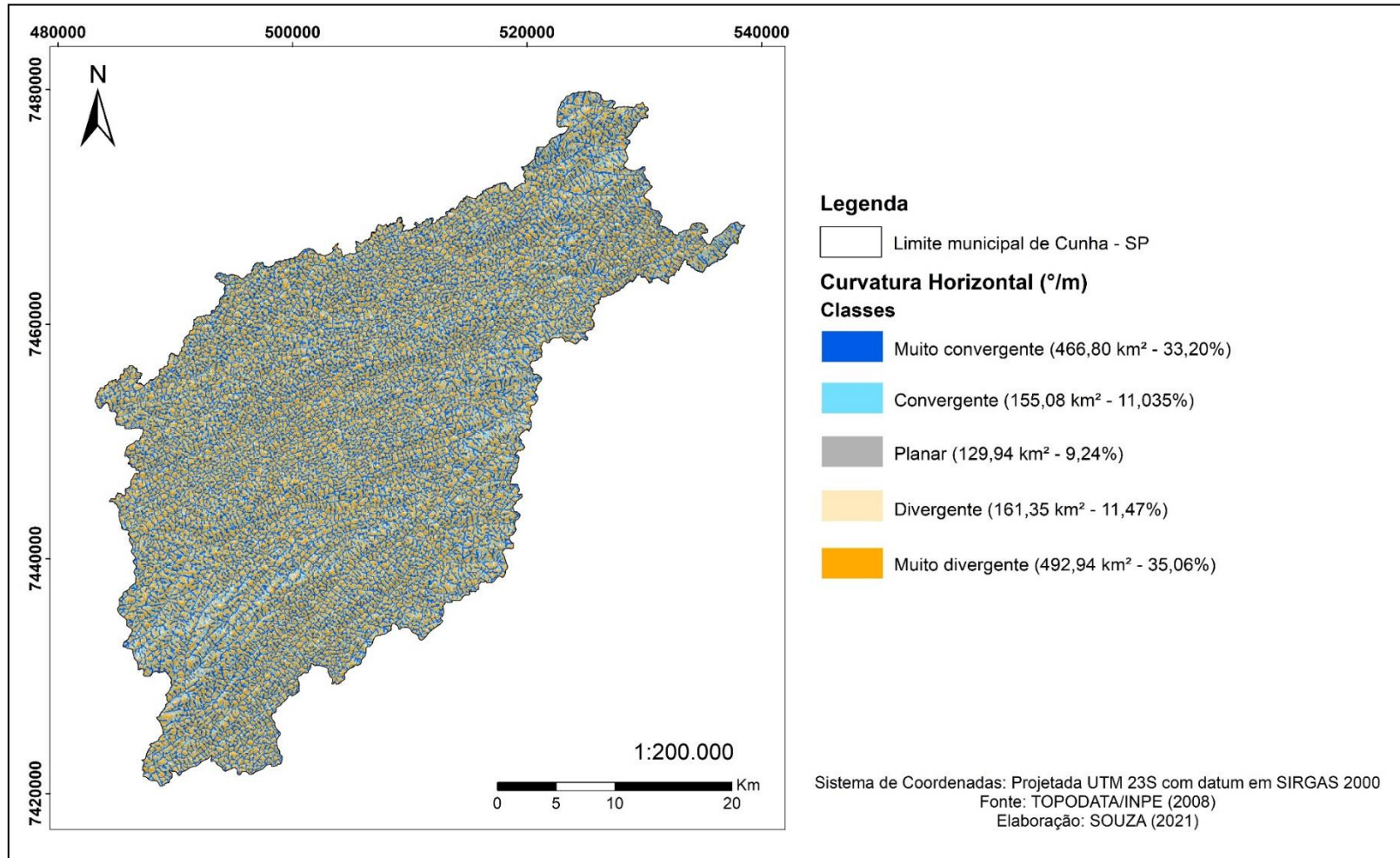
As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, as curvaturas horizontal e vertical de Cunha, podendo-se notar que para o município as maiores parcelas são correspondentes às classes muito divergente, com 35,06% da área total do município, e muito côncava, com 52,12%. Como medidas de concentração do escoamento 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 a 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 a 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).



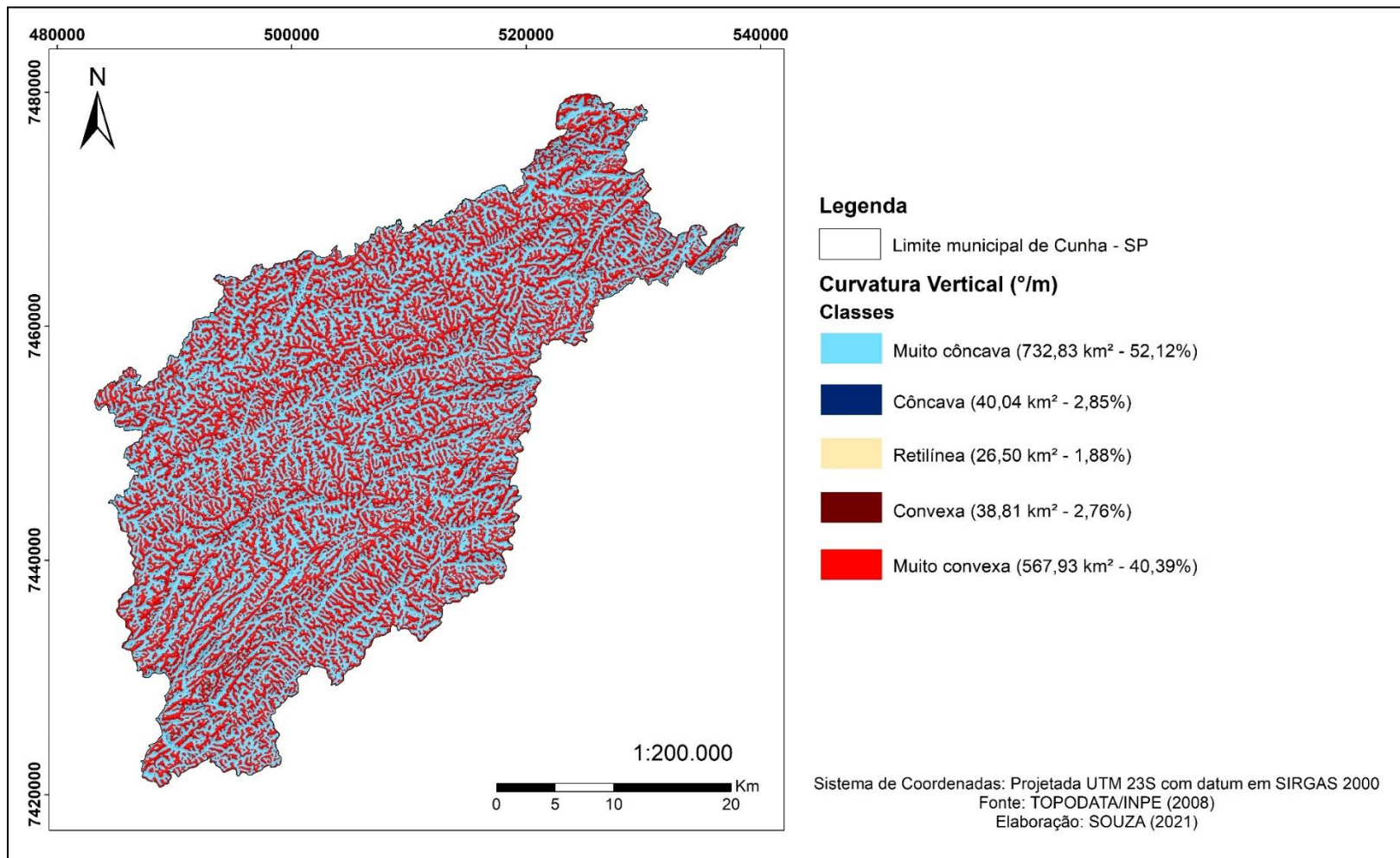
Figura 6 - Mapa de curvatura horizontal do município de Cunha/SP



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



Figura 7 - Mapa de curvatura vertical do município de Cunha/SP



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



4.6 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. (2014), 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 a 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.

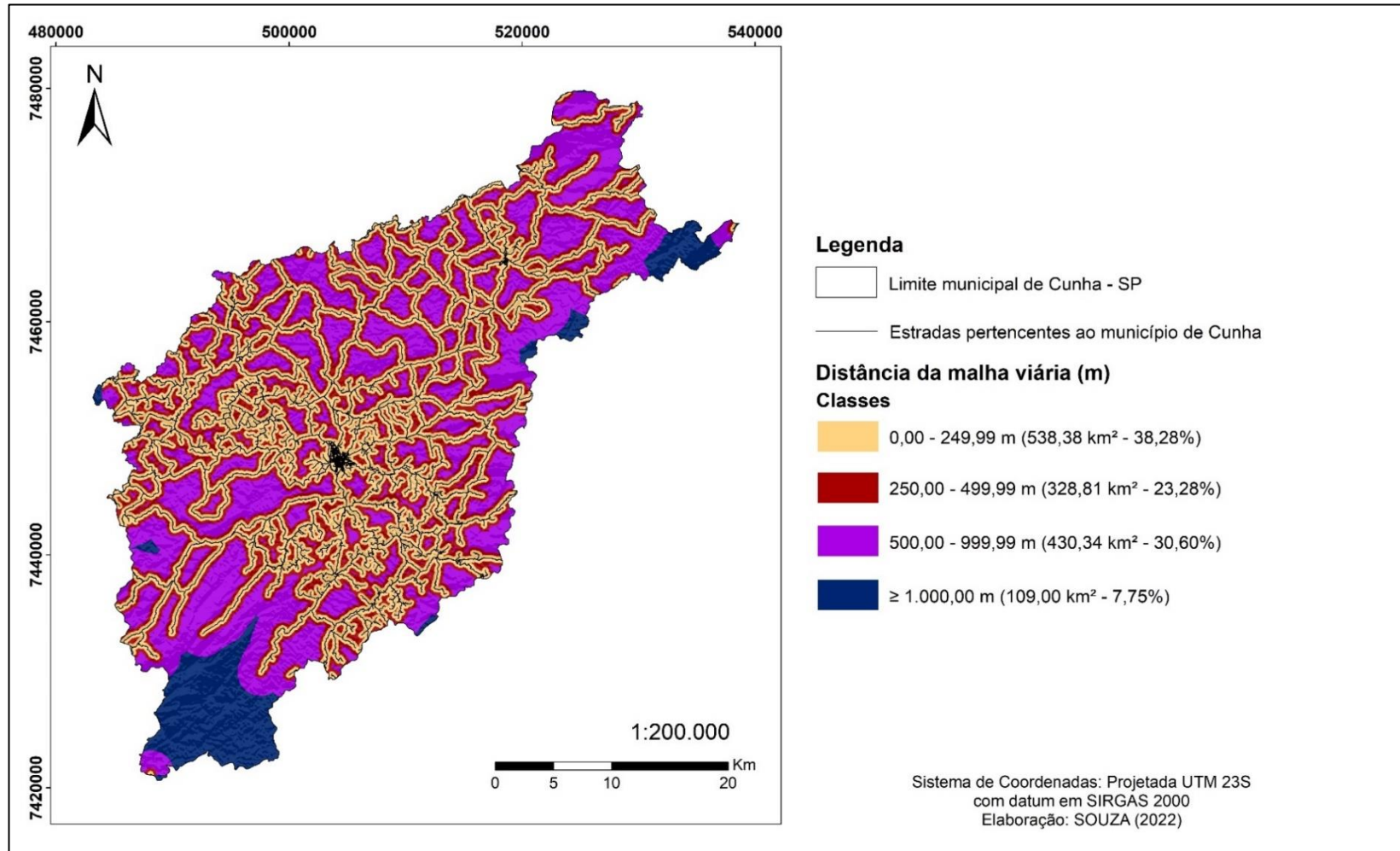
Padronizou-se, portanto, para a espacialização da malha viária de Cunha, quatro (4) classes, variando de 0,00 a 250,00 m da estrada para a primeira classe, e com o mesmo intervalo de diferença para as próximas duas (2) classes. A partir de 1.000,00 m de distância, delimitou-se até o limite do município, devido, sobretudo, a baixa ocupação populacional a partir de tais afastamentos das malhas viárias.

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 8 apresenta o mapa da distância da malha viária respectivo do município de Cunha.



Figura 8 – Mapa de distância da malha viária do município de Cunha/SP



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



4.7 Pesos das classes das variáveis

Diante dos dados apresentados, foi possível calcular os pesos de suscetibilidade de “0,00” a “1,00” para as classes das variáveis. As tabelas de “6” a “12” apresentam os pesos adotados para o cálculo da suscetibilidade.

Tabela 6 - Classes para a variável “Pedologia” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Classes para a variável “Litologia” do município de Cunha/SP para 2011

Litologia		
Classes	Cicatrizes	Pesos
Biotita granito	28	0,18
Granito, Granito pórfiro	0	0,00
Gnaise, Migmatito, Ortognaise, Rocha calcissilicática, Trondhjemito	1	0,01
Gnaise aluminoso, Rocha calcissilicática	36	0,23
Milonito, Quartzo xisto, Rocha calcissilicática, Rocha metaultramáfica	14	0,09
Biotita gnaise, Biotita xisto, Gnaise quartzoso, Milonito, Rocha calcissilicática	61	0,38
Granito	0	0,00
Anfibolito, Gnaise milonítico, Granada gnaise, Mármore, Metamarga, Quartzito	0	0,00
Augen gnaise, Biotita gnaise, Biotita granito, Biotitito, Gnaise, Migmatito, Muscovita-biotita gnaise, Ortognaise, Tonalito	0	0,00
Biotita granito, Monzogranito	2	0,01
Biotita granito, Granito gnáissico, Monzogranito, Muscovita granito	17	0,11
Granito, Granodiorito, Monzogranito	1	0,01

Fonte: Autoria própria.



Tabela 8 - Classes para a variável “Uso e Cobertura do Solo” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Classes para a variável “Declividade” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Classes para a variável “Curvatura Horizontal” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.



Tabela 11 - Classes para a variável “Curvatura Vertical” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Classes para a variável “Distância da malha viária” do município de Cunha/SP para 2011

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

Fonte: Autoria própria.

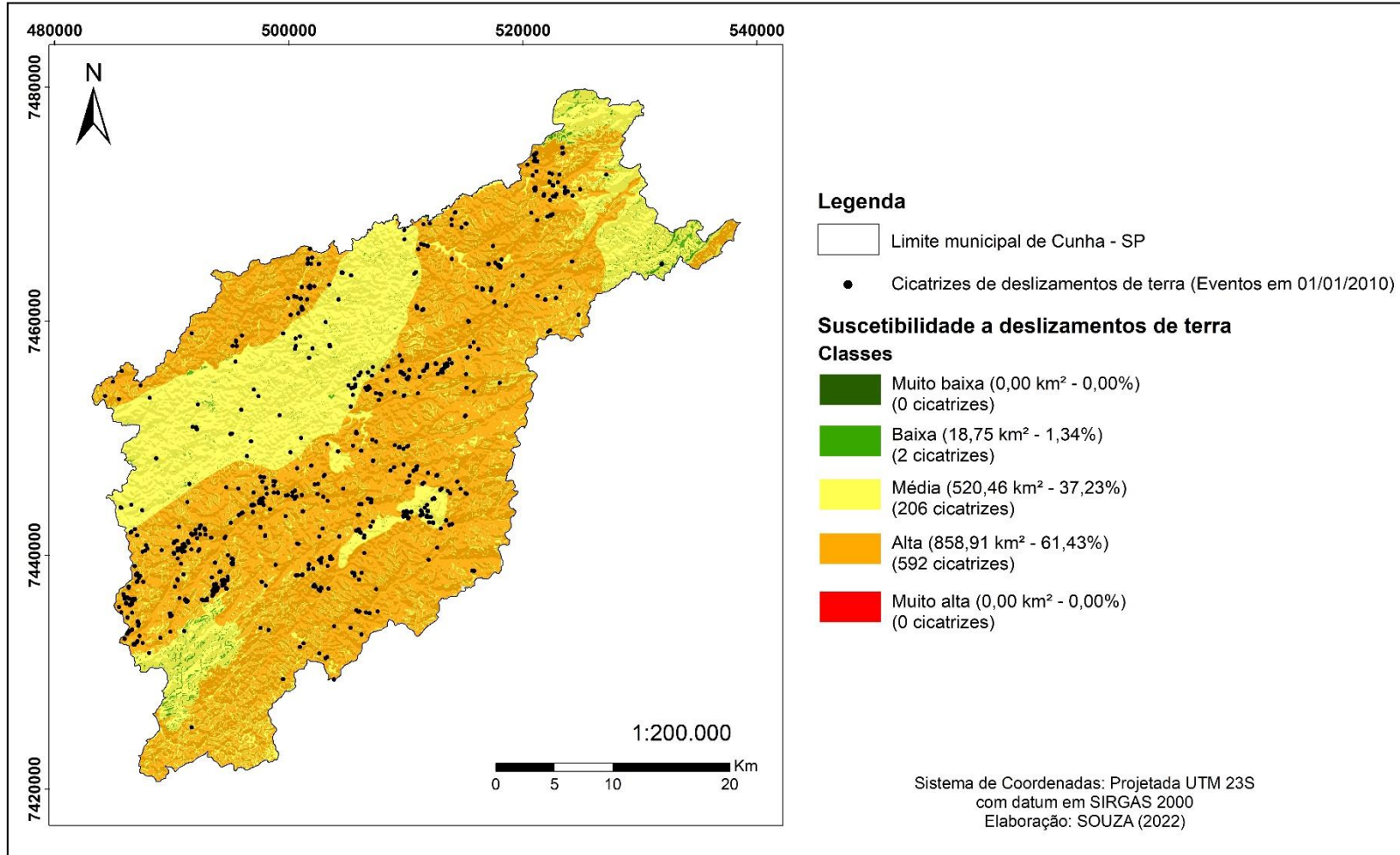
Em seguida, através do software ArcGIS® 10.8, e por intermédio da álgebra de mapas, aplicou-se a Equação 2, conforme indicado na seção “Metodologia” do presente Projeto.

4.8 Suscetibilidade a deslizamentos de terra

A Figura 9, por fim, apresenta o mapa temático final da suscetibilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha.



Figura 9 - Suscetibilidade a deslizamentos de terra do município de Cunha/SP para 2011



Fonte: Autoria própria.



Diante do que foi apresentado na Figura 9, é possível observar que a maior parte do município para o dia do evento encontrava-se na situação de suscetibilidade alta. Em outras palavras, dentro o intervalo estabelecido na Tabela 2, 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 dia do evento, 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.

A segunda classe mais preponderante no mapa foi a suscetibilidade média. Este valor varia entre 0,40 e 0,59 e representou 37,23% de Cunha, com uma extensão territorial de 520,46 km². Nesta classe foram contabilizadas 206 cicatrizes.

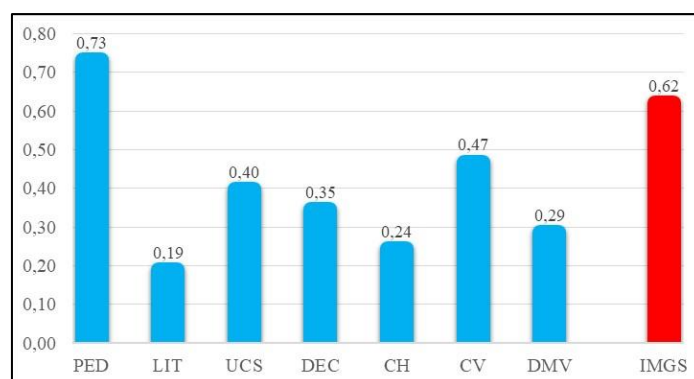
Por fim, as classes muito baixa e baixa representaram muito pouco para Cunha, sendo que apenas a classe de baixa suscetibilidade contabilizou cicatrizes (2) e com uma extensão territorial de 18,75 km², o que representa 1,34% de Cunha. A classe de muito baixa não teve contribuição no município, tal como a classe de muito alta. Esta última classe é esperada, uma vez que para os deslizamentos de terra, segundo o presente estudo, é necessária a 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 as alterações que as precipitações de chuvas foram capazes de impactar no meio físico.

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). 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. A Figura 10, portanto, apresenta a importância de cada variável frente a suscetibilidade obtida para o município.



Tabela 13 - Índices de Suscetibilidade das 800 cicatrizes para cada classe de variável ambiental do município de Cunha/SP para 2011



Fonte: Autoria própria.

Desta forma, percebe-se que o IMGS foi de 0,62, ou seja, a maior parte do município foi considerada e classificada como classe de alta suscetibilidade. A ordem decrescente da preponderância das variáveis foi: conforme já previsto: em primeiro lugar, a 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).

4.9 Mapas climáticos de Cunha

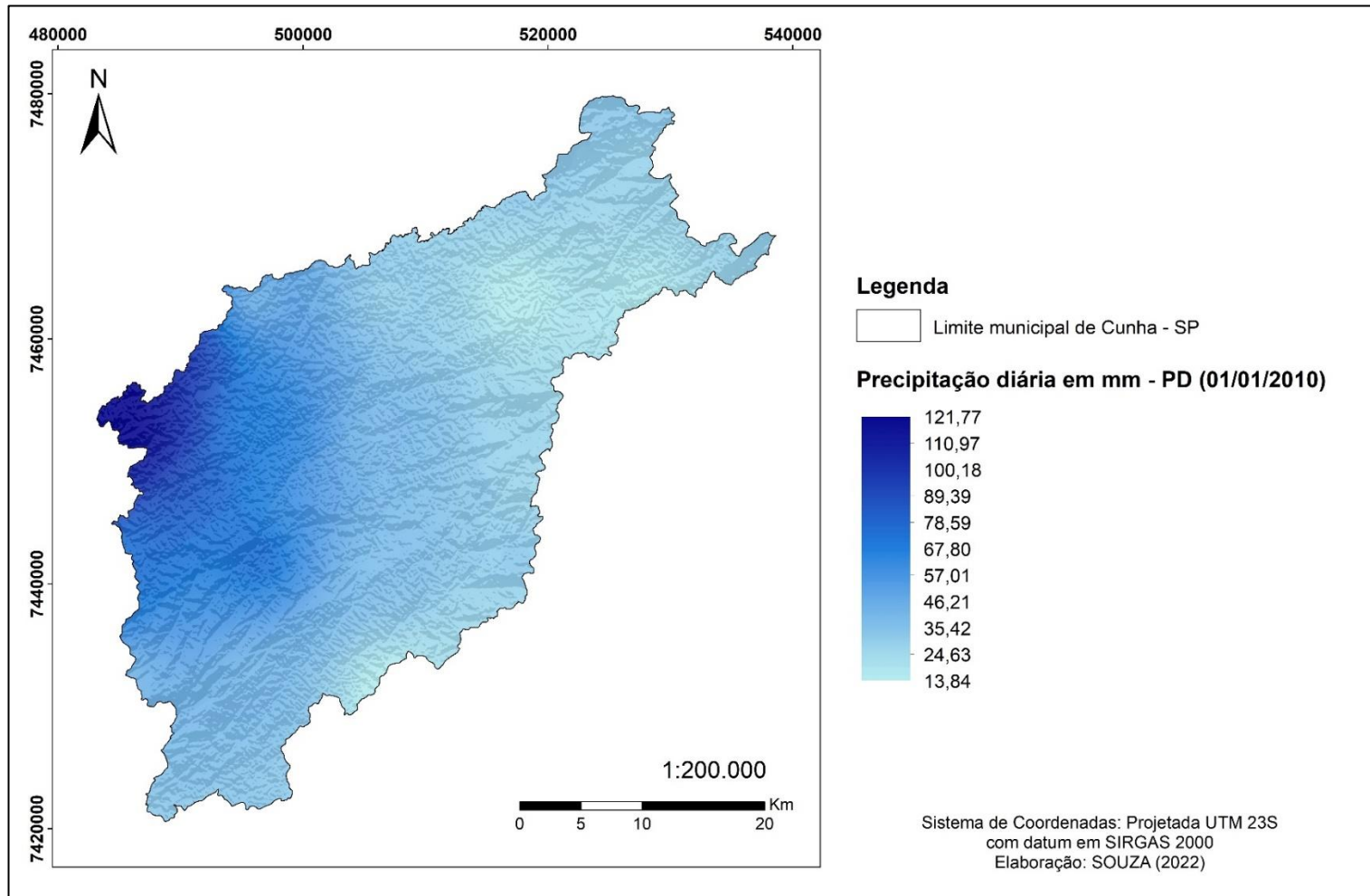
Tomando como base o dia do extremo climático ocorrido em Cunha (01/01/2010), que também é o dia de referência para o presente estudo, as Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam respectivamente os dados de:

- 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 ao “PD”, ao longo do município de Cunha teve variação de 13,84 mm até 121,77 mm. A “PA5” variou de 74,31 mm a 240,34 mm. A “MAXPA5” variou de 133,13 mm a 251,31 mm enquanto a “CPC”, de 15 a 115 mm.



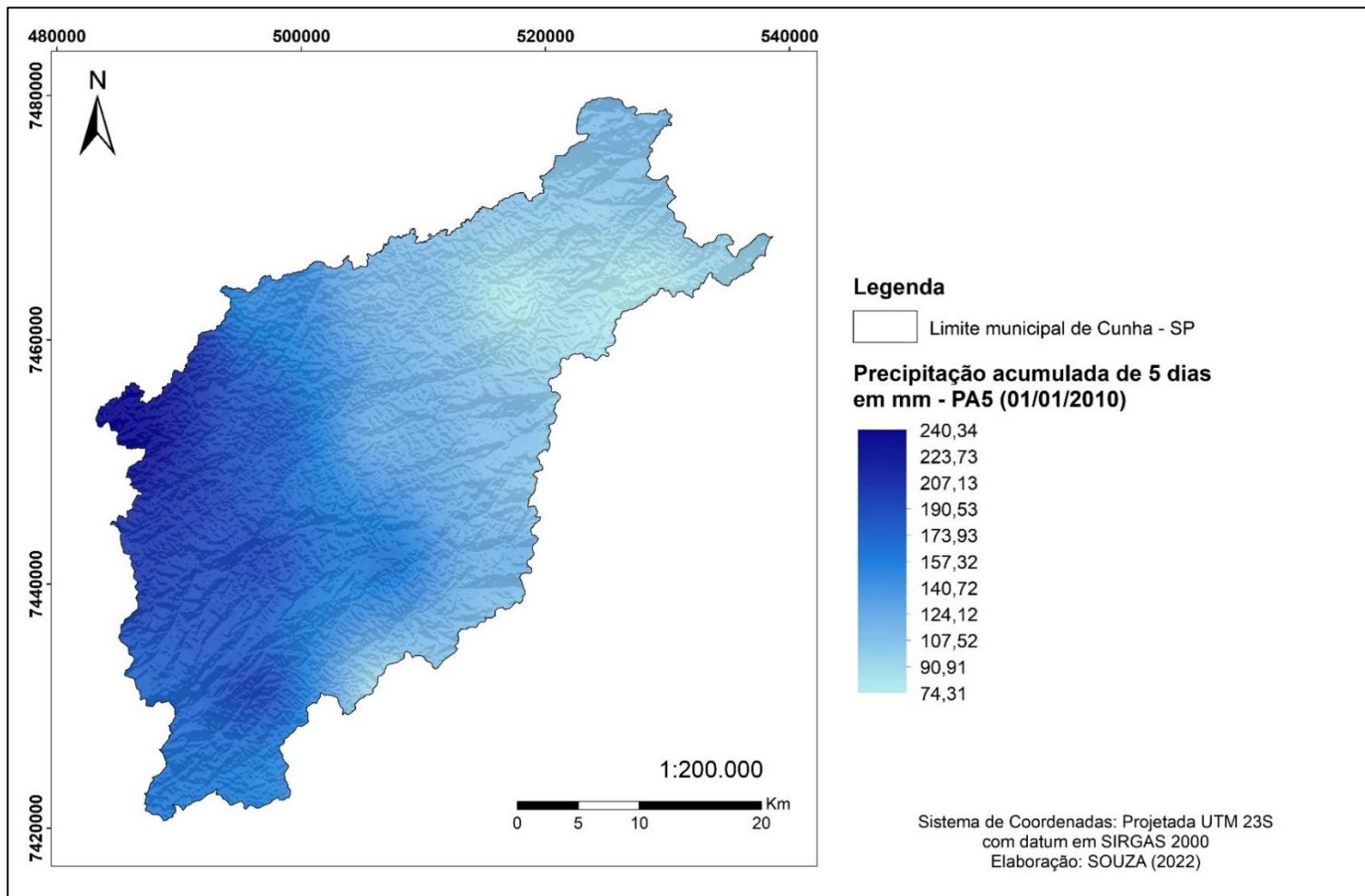
Figura 10 – Mapa de precipitação diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



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



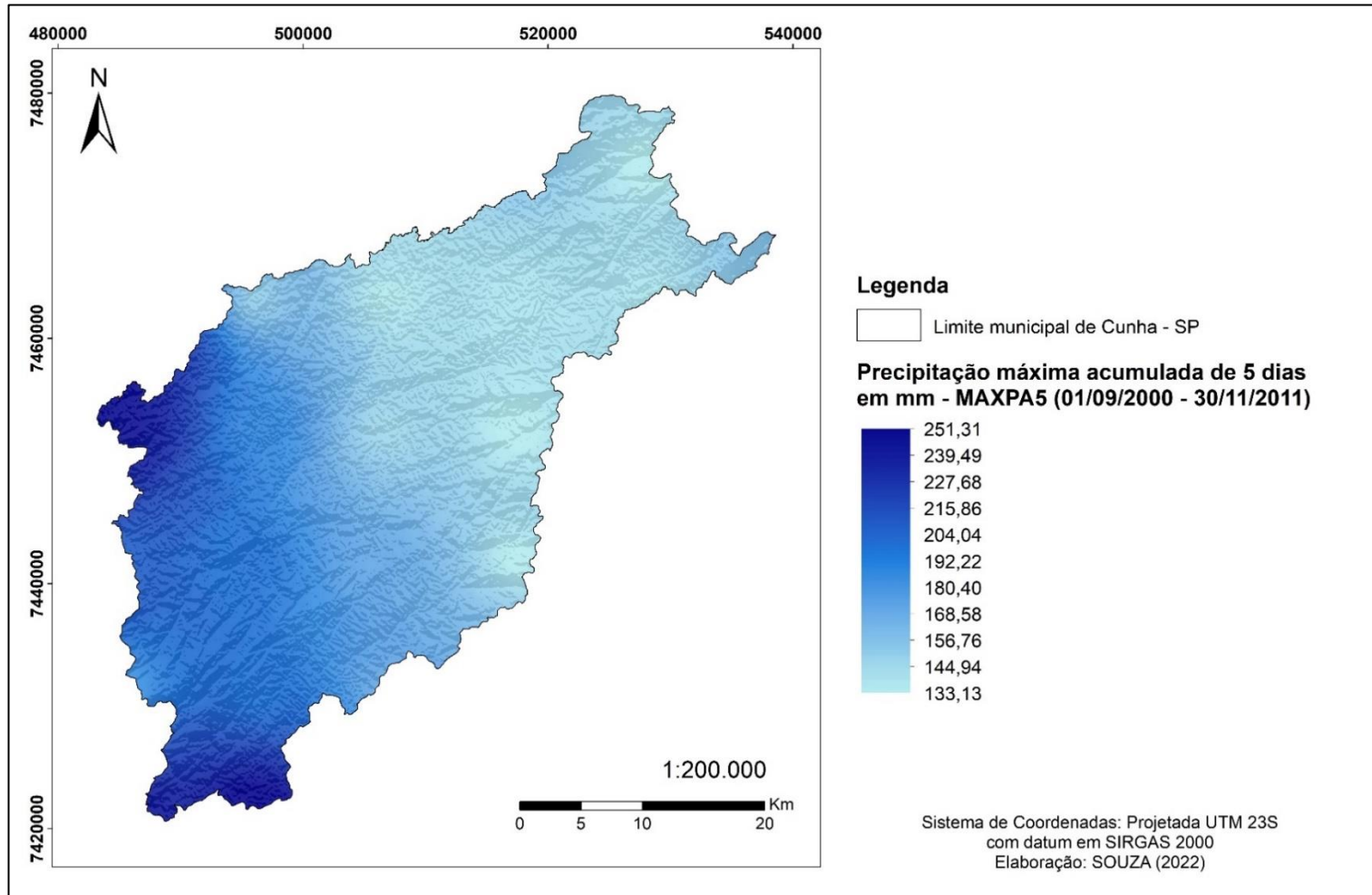
Figura 11 – Mapa de precipitação acumulada de 5 dias do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



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



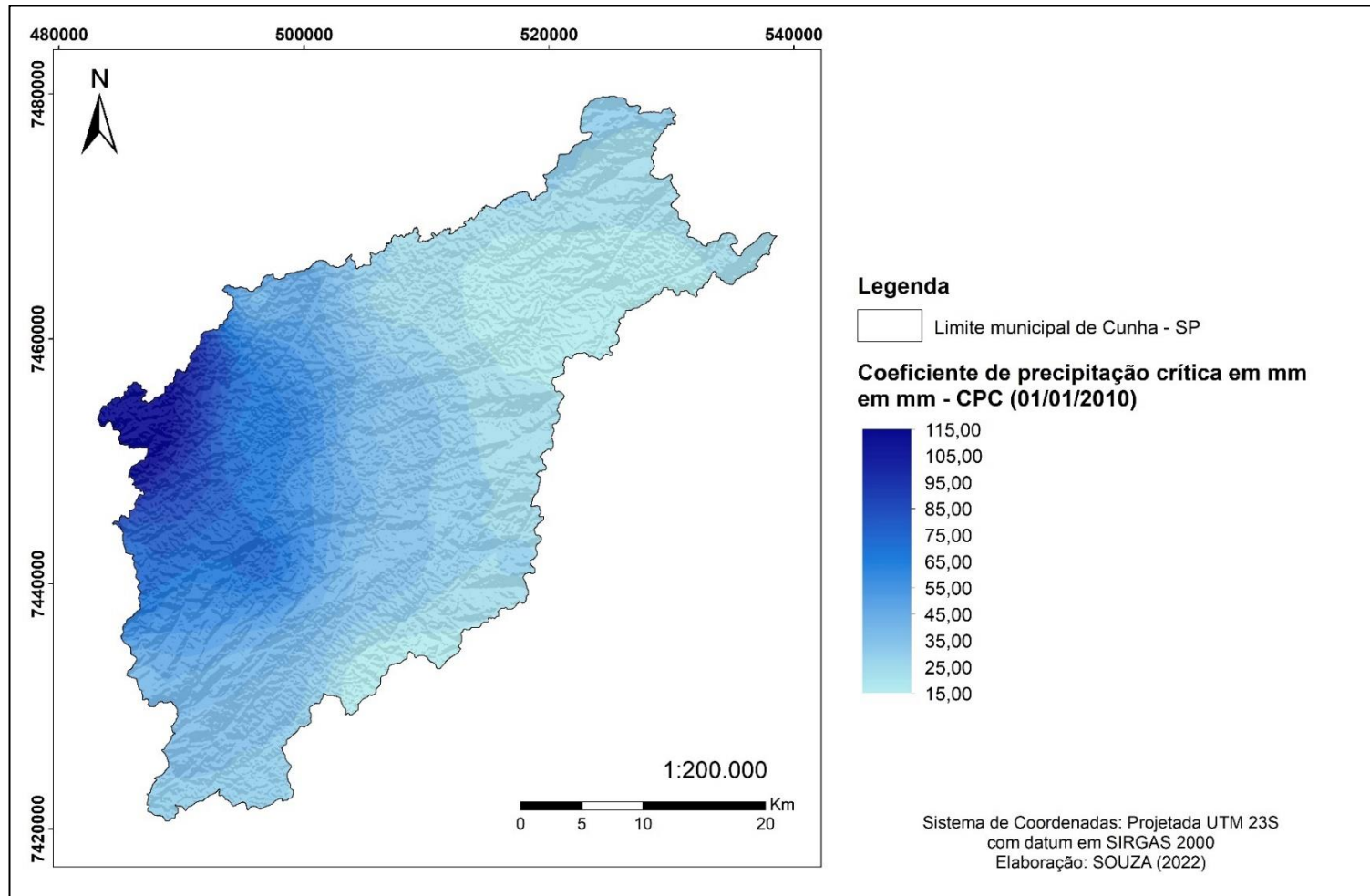
Figura 12 – Mapa de máxima precipitação acumulada de 5 dias diária do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



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



Figura 13 – Mapa do coeficiente de precipitação crítica do município de Cunha/SP (dia 01/01/2010)



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



4.10 Vulnerabilidade a deslizamentos de terra

O mapa de vulnerabilidade para o município de Cunha foi gerado através da álgebra de mapas no *software* ArcGIS® 10.8, com a sobreposição do mapa obtido da suscetibilidade, com os respectivos mapas dos índices pluviométricos obtidos para o dia 01/01/2010 (representados pelas Figuras 10 a 13). O mapa de vulnerabilidade é apresentado na Figura 14.

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. As demais classes não foram observadas.

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.

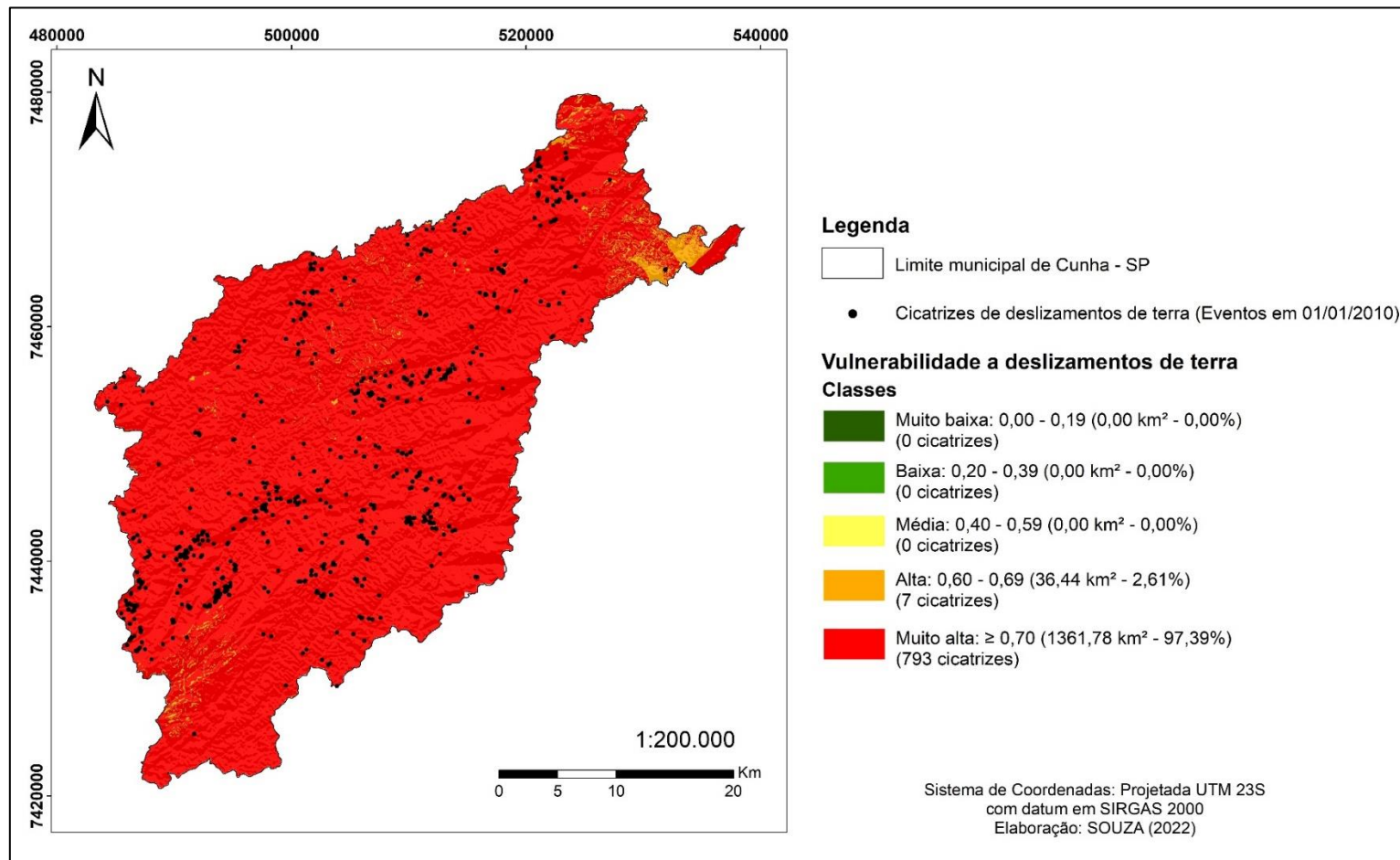
Assim, os índices adotados para as classes de vulnerabilidade que foram padronizados e apresentados na Tabela 2, com intervalos de 0,00 a 0,19 (muito baixa vulnerabilidade); 0,20 a 0,39 (baixa); 0,40 a 0,59 (média); 0,60 a 0,69 (alta); e \geq a 0,70 (muito alta), apontaram que para todo o mapa de Cunha, os índices de vulnerabilidade obtidos foram maiores ou iguais ao valor de 0,60.

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 a 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 14 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha (01/01/2010)



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. O resultado obtido através dessa metodologia é possível ser observada na Figura 15.

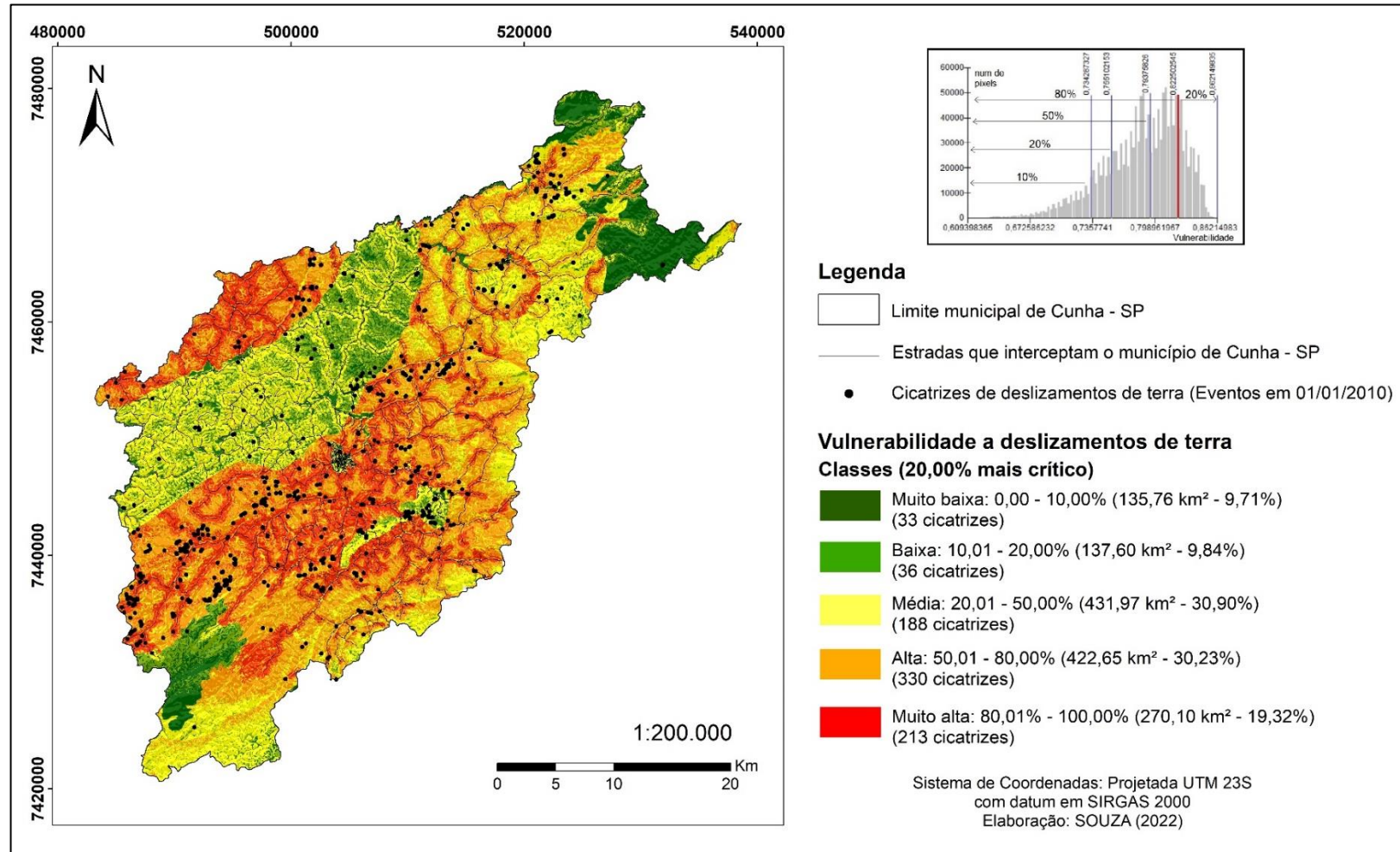
Este tipo de classificação é feito para vários fenômenos da natureza, onde se procura definir um limiar crítico que, a partir deste, há a ocorrência de eventos considerados extremos/raros. Pode-se citar esta ocorrência na análise, por exemplo, de dados pluviométricos (SILVA, 2014).

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 estudos 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 15.



Figura 15 – Mapa da vulnerabilidade a deslizamentos de terra no município de Cunha – 20,00 % mais críticos (01/01/2010)



Fonte: Autoria própria (2022).



Com relação a Figura 15, mais de 25% das cicatrizes se encontraram 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 apresentou resultados mais satisfatórios frente as 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 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).

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.



4.11 Projeções climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5 – ocorrência de novos eventos entre 2022 e 2040

Como já mencionado, foram projetados os valores de precipitação para o período de 2022 a 2040 para Cunha. Com os limiares estabelecidos de 15,00 mm de precipitação diária ou 79,30 mm de precipitação acumulada de 5 dias, 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.

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 01/01/2022 a 30/12/2040, no município de Cunha poderá haver a ocorrência de deslizamentos de terra em setenta (70) outras datas, devido aos índices maiores ou iguais (\geq) a 0,70 para as 800 cicatrizes de deslizamentos de terra identificadas para a área de estudo.

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 e assim desenvolva e implemente novas políticas públicas tais como de uso e ocupação e de alerta e monitoramento de eventos de precipitação, de modo a tornar a comunidade mais resiliente frente aos desastres naturais, mitigando novos problemas ambientais, econômicos e sociais.

4.12 Demais resultados obtidos durante a pesquisa

Irving Rodrigues de Souza (SOUZA, I. R.), de agosto de 2019 a junho de 2022, participou também de diversos trabalhos científicos ambientais do DIIAV/INPE-CP, conforme alguns citados abaixo:

FARIAS, J. F. S.; SILVA, L. T.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILLO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. *Biomass do Brasil: cerrado, Mata Atlântica e pampa*. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (*Biomass do Brasil: cerrado, Mata Atlântica e*



pampa). Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.14.11/doc/biomas%20do%20brasil_cerrado.pdf>.

FARIAS, J. F. S.; SILVA, L. T.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B. ; GRILO, L. M. ; **SOUZA, I. R.** ; ROSA, M. B. ; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Qualidade do ar. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Qualidade do ar). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.14.17/doc/qualidade%20do%20ar.pdf>>.

FARIAS, J. F. S.; SILVA, L. T.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Recuperação de nascentes. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Recuperação de nascentes). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.15.00/doc/recuperacao%20de%20nascentes.pdf>>.

SILVA, L. T.; FARIAS, J. F. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Biomas do Brasil: Amazônia, caatinga e Pantanal. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Biomas do Brasil: Amazônia, caatinga e Pantanal). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.14.09/doc/biomas%20do%20brasil.pdf>>.

SILVA, L. T.; FARIAS, J. F. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Desmatamento. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Desmatamento). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.14.12/doc/desmatamento.pdf>>.

SILVA, L. T.; FARIAS, J. F. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Queimadas. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Queimadas). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.14.58/doc/queimadas.pdf>>.

SILVA, L. T.; FARIAS, J. F. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M. Reflorestamento. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas



Espaciais - INPE, 2019 (Reflorestamento). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.15.01/doc/reflorestamento.pdf>>.

SILVA, L. T.; FARIAS, J. F. S.; TEIXEIRA, D. L. S.; GOMES, L. B.; GRILO, L. M.; **SOUZA, I. R.**; ROSA, M. B.; MORAES, T. S.; SAMPAIO, E. P. F. F. M.

Suscetibilidade e vulnerabilidade a escorregamento de terras. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2019 (Suscetibilidade e vulnerabilidade a escorregamento de terras). Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.17.15.02/doc/suscetibilidade.pdf>>.

SILVA, L. T.; **SOUZA, I. R.**; TEIXEIRA, D. L. S. Suscetibilidade e vulnerabilidade a escorregamento de terras: estudo de caso: Bacia do Rio Bengalas, 2011. 2019. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3U48F95>>.

SOUZA, I. R.; SILVA, L. T.; SOARES, P. V.; TEIXEIRA, D. L. S.; MORAES, T. S.; GRILO, L. M. Análise da dinâmica do desmatamento da Amazônia Legal com ênfase no estado do Pará. In: III Encontro Acadêmico da Engenharia Ambiental da EEL-USP, 2019, Lorena-SP. Anais do Encontro Acadêmico da Engenharia Ambiental. Lorena-SP: EEL-USP, 2019. v. 3. Disponível em :<https://enamb.eel.usp.br/system/files/2018/trabalho/283/irvingenamb19_0.pdf>.

SOUZA, I. R.; TEIXEIRA, D. L. S.; SILVA, L. T. Técnicas de preservação e recuperação ambiental: um projeto de revitalização do espaço escolar. 2019. (Curso). Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3UFHAA5>>.

TEIXEIRA, D. L. S.; **SOUZA, I. R.**; MORAES, T. S.; SILVA, L. T. Uso de geotecnologias em estudos ambientais. 2019. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3U48DP5>>.

Para conferir a lista completa dos artigos/eventos/demais publicações do autor, acessar o Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0057449879291962>.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste estudo permitiu a adaptação, através Processo Analítico Hierárquico - AHP, da modelagem de suscetibilidade a deslizamentos de terra desenvolvida por Silva (2014) para uma nova área de estudo (Equação 2). Com isso, avaliou-se as áreas mais suscetíveis e vulneráveis a deslizamentos de terra para o município de Cunha. Através da modelagem para a presente área de estudo, identificou-se que além das variáveis pedologia, litologia, uso e



cobertura do solo, declividade, curvatura horizontal e curvatura vertical, a variável de infraestrutura, denominada distância da malha viária, se mostrou de extrema importância para a caracterização das áreas mais críticas e sujeitas a estes tipos de desastres naturais.

A metodologia aplicada para a vulnerabilidade, por sua vez, foi a mesma que a desenvolvida por Silva (2014). A data escolhida para a análise foi a de 01/01/2010, onde data a ocorrência de alta precipitação de chuvas desencadeou diversos eventos de deslizamentos de terra, inclusive que culminaram 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 a ocorrência das cicatrizes se concentrou nas classes: Cambissolos, para a pedologia; Biotita gnaisse, 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 para distâncias 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) 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.

Com isso, 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 3. Os valores obtidos variaram de 0,70 a 0,86, onde identificou-se que para valores



de precipitação diária acima de 15,00 mm ou precipitação acumulada de 5 dias de 79,30 mm, poderá haver a deflagração de eventos de deslizamentos de terra.

Por fim, do ponto de vista das projeções climáticas Eta HadGEM-ES RCP 4.5, avaliando o período de 2022 a 2040 foram verificados que 70 outras diferentes datas com eventos extremos de precipitação podem ocorrer, desencadeando novamente diversos deslizamentos de terra. Deve-se, portanto, investir em novas políticas públicas para prevenção de novas catástrofes no município de Cunha, a citar os problemas de quedas de barreiras, pontes, inundações e bloqueios de barreira que ocorreram e impactaram enormemente 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.

Embora os resultados obtidos tenham sido coerentes frente aos acontecimentos de Cunha, é importante frisar que para a obtenção deles, um tempo de médio a longo prazo foi necessário. Devido à falta de muitos dos dados necessários para o presente estudo, como informações da literatura, além da pouca existência de dados georreferenciados, o contato direto com alguns setores da comunidade, como blogs, sites, e moradores, sobretudo de caráter local, foram os essenciais para se fazer um levantamento satisfatório. Contudo, ressalta-se que devido à grande importância da temática envolvida, a ausência de dados, além da dificuldade, aponta uma fragilidade na organização e mobilização para propostas efetivas de cuidado perante o município e seus moradores.

Portanto, seria de enorme valia tanto para as instituições de ensino e pesquisa quanto para o município de Cunha a criação de um banco de dados gratuito e 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 do município.



REFERÊNCIAS

- ANA. **Agência Nacional de Águas. Paraíba do Sul.** Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/paraiba-do-sul-saiba-mais>> Acesso em: 26 jul. 2021.
- BARNES, S. L. **Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations, NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-62 [NTIS COM-73-10781],** March, National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, 60 pp, 1973.
- BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. **Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19dez. 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- _____. Secretaria de Educação do Estado do Paraná. **Paraná: Neossolo.** 2013. Disponível em: <<http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=1544&evento=7%3E>> 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.** 2014. Natural Hazards and Earth System Science. 2. 10.5194/nhessd-2-1945-2014.
- CAMPOS, L. E. P. **Utilização de parâmetros de solos não saturados em encostas.** 2017. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Disponível em: <<http://www.geotecnia.ufba.br/arquivos/ST5-Tp03.pdf>> Acesso em: 24 abr. 2022.
- COHEN, J.A., 1960. **Coefficient of Agreement for Nominal Scales. Educational and Psychological Measurement.** 20, 37-46.
- Congalton, R. G. **A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data.** Remote Sensing of Environment, 37, 35–46. 1991.
- CORDERO, A.; et al. **Estudo da precipitação máxima diária para Blumenau-SC e o evento de novembro de 2008.** Anais XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, Brasil, 2009.
- 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, n. 23, p.23-35, abr. 2011. Disponível em:
<<https://www.scielo.br/pdf/sn/v23n1/03.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.

GERZSENYI, D.; ALBERT, G. **Landslide inventory validation and susceptibility mapping in the Gerecse Hills**, Hungary. Geo-spatial Information Science. 1-11. (2021). 10.1080/10095020.2020.1870872.

HOGAN, D. J. **Urban Growth, Vulnerability and Adaptation: Social and ecological dimensions of climate change on the Coast of São Paulo**. Projeto de Pesquisa aprovado pelo Programa FAPESP em Mudanças Climáticas Globais. Campinas, 2009.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Manuais técnicos em geociências, nº 4, 2a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. Manuais técnicos em geociências, nº 4, 2a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316p.

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

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2018. **Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/cunha/panorama>> Acesso em: 26 jul. 2021.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro. 2018.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Vítimas de deslizamentos. Levantamento do IPT de mortes causadas por deslizamentos**. 01.02.2017. Disponível em: http://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**. 2014. International journal of Environmental Science and Technology. 11. 10.1007/s13762-013-0464-0.

LANDIS, J.R, KOCH, G.G., 1977. **The measurement of observer agreement for categorical data**. Biometrics 33, 159-174.

LIMA, R. L. **Avaliação do algoritmo SVM na detecção de comportamentos suspeitos em cenas de vídeo**. 2014. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

MHE. **Banco de dados**. Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2000. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/banco-de-dados/>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

MMA: Ministério do Meio Ambiente. Projeto PDA 094-MA. **VIVER NA MATA ATLÂNTICA: Recuperação de Matas Ciliares junto a Agricultores Familiares da Estância Climática de Cunha – SP**. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/8140-sp-cunha.html>> Acesso em: 26 jul. 2021.

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 apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Área de concentração em Gestão de Riscos em Geotecnia e Desastres Naturais. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. Brasil. 2017. Disponível em: <http://nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dissertacao-avaliacaoinfluenciaescala.pdf> Acesso em: 27 jul. 2021.

MOURA, I. F. M. S. **Simulação e avaliação de incisões cirúrgicas com realidade virtual**. 2017. 171 f. Dissertação (Mestrado em Modelos de Decisão e Saúde)-Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

NAE - NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. (2005). **Mudança do Clima**. Brasília: NAE, Secretaria do Governo e Gestão Estratégica.

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. 47 f. TCC



(Graduação) – Curso de Geografia, Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

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

PRIETO, C. C.; MENDES, R. M.; SIMÕES, S. J. C.; NOBRE, C. A.
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, n. 1, p.71-87, 2017.

QGIS. **User Guide: 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.

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 de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração em Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Naturais e Exatas. Universidade de Santa Maria. Santa Maria – RS. Brasil. 2007. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppggeo/files/dissertacoes_06-11/BernadeteReckziegel.pdf.> Acesso em: 26 jul. 2021.

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. 113 f. 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 “Suíça Brasileira”**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, n. 1, 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.



SANTOS, H. G; ZARONI, M. J. **Acervo da Embrapa solos – Árvore do Conhecimento**. EMBRAPA. 2006. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos>> Acesso em 24 abr. 2022.

SEADE. Fundação Seade. Portal de Estatísticas do Estado de São Paulo. **Perfil dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <http://www.perfil.seade.gov.br/> . Acesso em: 27 jul. 2020.

SILVA, L. T. da. **Vulnerabilidade ao escorregamento de terras - Estudo de caso: Bacia do Rio Bengalas, 2011**. 2014. 248 f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) - Universidade de Évora, Évora-Portugal, 2014.

SOARES, A. T. de M. **Mapeamento geológico, análise estrutural e metamorfismo nas proximidades de Campos de Cunha, São Paulo**. 2018. 75p. Trabalho de Graduação (Graduação em Geologia, Instituto de Geociências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2018. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4254/1/SOARES%2c%20A.T.deM.pdf>> Acesso em 24 abr. 2022.

TEIXEIRA, D. L. S. **Mapeamento e análise socioambiental de áreas de suscetibilidade a escorregamentos de terra no município de Campos do Jordão (SP)**. 2019. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

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

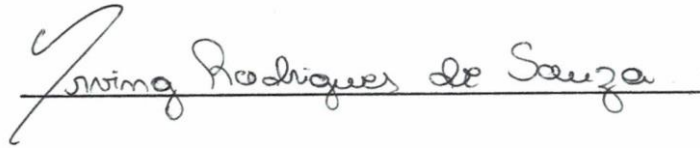
TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

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, jan. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e12018397-417>. Acesso em: 26 jul. 2020.

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



Cachoeira Paulista, junho de 2022.

A handwritten signature in black ink, reading "Irving Rodrigues de Souza", written over a horizontal line. The signature is cursive and includes a large initial flourish.

Irving Rodrigues de Souza

