

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALEXANDRE GEHLING BERTOLDI

**RETROANÁLISE DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS EM
CAXIAS DO SUL/RS EM DECORRÊNCIA DE EVENTO EXTREMO DE
PRECIPITAÇÃO EM 2024**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ALEXANDRE GEHLING BERTOLDI

**RETROANÁLISE DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS EM
CAXIAS DO SUL/RS EM DECORRÊNCIA DE EVENTO EXTREMO DE
PRECIPITAÇÃO EM 2024**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora:
Profa. Fernanda Simoni Schuch, Doutora

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Bertoldi, Alexandre

RETROANÁLISE DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS EM
CAXIAS DO SUL/RS EM DECORRÊNCIA DE EVENTO EXTREMO DE
PRECIPITAÇÃO EM 2024 / Alexandre Bertoldi ; orientador,
Fernanda Schuch, 2025.

118 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Graduação
em Engenharia civil, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Engenharia Civil. 3. Movimentos
de Massa. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Retroanálise. I.
Schuch, Fernanda. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia civil. III. Título.

**RETROANÁLISE DOS MOVIMENTOS DE MASSA OCORRIDOS EM CAXIAS DO
SUL/RS EM DECORRÊNCIA DE EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO EM
2024**

ALEXANDRE GEHLING BERTOLDI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção de título de Engenheiro Civil aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de agosto de 2025.

Banca Examinadora:

Fernanda Simoni Schuch, Doutora

Maurília de Almeida Bastos, Doutora
Instituto Federal de Santa Catarina

Fábio Krueger da Silva, Doutor
Instituto Federal de Santa Catarina

Gisele Marilha Pereira Reginatto, Mestre
Engevix

RESUMO

Eventos extremos de precipitação podem desencadear movimentos de massa, causando impactos significativos em áreas urbanas e rurais. Diante disso, compreender a relação entre esses eventos e as áreas suscetíveis é fundamental para aprimorar a gestão de riscos e a prevenção de desastres. Visando contribuir com esta temática, este trabalho tem como objetivo analisar os movimentos de massa ocorridos em Caxias do Sul/RS em decorrência do evento extremo de precipitação ocorrido entre abril e maio de 2024. A pesquisa envolveu tratamento e análise de dados vetoriais e matriciais, com a utilização de imagens gratuitas do satélite *Sentinel-2*, carta de suscetibilidade do município e cartas topográficas fornecidas pelo Serviço Geológico Brasileiro. O estudo adotou metodologias de geoprocessamento e análise espacial por meio do *software* QGIS, permitindo a comparação entre as áreas atingidas pelos movimentos de massa e as áreas suscetíveis de ocorrência deste fenômeno definidas na carta de suscetibilidade. Por fim, avaliou-se a acurácia da carta de suscetibilidade a movimentos de massa e verificou-se que a previsão de risco geral para o município demonstrou ser eficaz, com a maioria dos movimentos de massa ocorrendo em áreas classificadas como de alta suscetibilidade. No entanto, a delimitação de regiões para tipos específicos de movimentos (corridas de massa, escorregamento/solapamento e inundações) apresentou menor correspondência com os eventos observados, sugerindo uma necessidade de aprimoramento dessas classificações, especialmente diante de eventos extremos de precipitação.

Palavras-chave: Movimentos de massa. Eventos extremos. Geoprocessamento. Carta de suscetibilidade. Retroanálise.

ABSTRACT

Extreme precipitation events can trigger mass movements, causing significant impacts in urban and rural areas. Therefore, understanding the relationship between these events and susceptible areas is essential for improving risk management and disaster prevention. Aiming to contribute to this theme, this study analyzes the mass movements that occurred in Caxias do Sul/RS due to the extreme precipitation event between April and May 2024. The research involved the processing and analysis of vectorial and matrix data, using free Sentinel-2 satellite images, the municipality's susceptibility map, and topographic maps provided by the Brazilian Geological Survey. The study adopted geoprocessing and spatial analysis methodologies using QGIS software, allowing for the comparison between areas affected by mass movements and areas susceptible to this phenomenon as defined in the susceptibility map. Finally, the accuracy of the mass movement susceptibility map was evaluated, and it was found that the general risk prediction for the municipality proved to be effective, with most mass movements occurring in areas classified as highly susceptible. However, the delimitation of regions for specific types of movements (debris flows, landslides/slumps, and floods) showed less correspondence with the observed events, suggesting a need for improvement in these classifications, especially in the face of extreme precipitation events.

Keywords: *Mass movements. Extreme events. Geoprocessing. Susceptibility map. Back-analysis.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Imagem aérea de Galópolis em 18 de maio de 2024	18
Figura 2 -	Encosta: Serra do Mar - Paraná	21
Figura 3 -	Talude artificial: imagem do aterro sanitário municipal Joseense, São José dos Campos/SP	22
Figura 4 -	Representação de queda de blocos	24
Figura 5 -	Queda de blocos em Vila Velha/ES em 2016	24
Figura 6 -	Representação de escorregamento rotacional	25
Figura 7 -	Representação de escorregamento translacional.....	26
Figura 8 -	Fotografias de superfícies de escorregamentos: (a) translacional; (b) rotacional	27
Figura 9 -	Escorregamento ocorrido em Vila Canária, Salvador, em 2009	27
Figura 10 -	Representação de rastejos.....	28
Figura 11 -	Rastejos no Morro do Benjamin, São José/SC.....	29
Figura 12 -	Representação de corridas.....	30
Figura 13 -	Campo de futebol antes e depois das corridas do Rio Vieira.....	31
Figura 14 -	Composição de imagens geradas pelo satélite <i>Sentinel-2</i> de Florianópolis/SC.....	38
Figura 15 -	Imagens com resolução espacial de 30m, 10m e 1m	41
Figura 16 -	Mapa de uso e ocupação do solo de Uberlândia/MG	43
Figura 17 -	Mapa de padrões de desmatamento da Amazônia Legal a partir de processo de classificação por algoritmo.....	44
Figura 18 -	Mapa de uso e ocupação do solo de Ribeirão Preto/SP.....	45
Figura 19 -	Áreas de grande impacto antes o evento, 27/05/2019, Iguape/SP	47
Figura 20 -	Áreas de grande impacto após o evento, 19/06/2019, Iguape/SP	47
Figura 21 -	Zoneamento das classes de suscetibilidade (laranja escuro: alta; laranja claro: intermediária; amarelo: baixa)	50
Figura 22 -	Cicatrizes de deslizamentos, Ilhota/SC.....	51
Figura 23 -	Fluxograma: Etapas do trabalho	54
Figura 24 -	Bacias Hidrográficas em Caxias do Sul	56

Figura 25 -	Mapa de precipitações médias anuais e mensais.....	58
Figura 26 -	Hietogramas – Médias mensais	59
Figura 27 -	Mapa geológico da área urbana de Caxias do Sul/RS.....	60
Figura 28 -	Mapa hipsométrico de Caxias do Sul.....	62
Figura 29 -	Mapa de declividade de Caxias do Sul	63
Figura 30 -	Mapa de relevo de Caxias do Sul	64
Figura 31 -	Feições associadas a movimentos de massa identificadas em imagens do satélite <i>PlanetScope</i>	66
Figura 32 -	Exemplo de cicatrizes identificadas em imagens de satélite PlanetScope e visão oblíqua em campo, Bento Gonçalves/RS.....	67
Figura 33 -	Imagens do satélite Sentinel-2 - original (à esquerda); após correção (à direita)	68
Figura 34 -	Composição RGB a partir de imagens de satélite Sentinel-2	69
Figura 35 -	Composição RGB limitada à área de estudo	70
Figura 36 -	Recorte da Composição RGB Antes do Evento de 2024 em Caxias do Sul.....	71
Figura 37 -	Recorte da Composição RGB Depois do Evento de 2024 em Caxias do Sul – Cicatrizes Visíveis em Destaque.....	71
Figura 38 -	Exemplo de layout de mapa de delimitação de cicatrizes com zonas de origem de movimentos de massa.....	72
Figura 39 -	Mapa de Cicatrizes de Movimentos de Massa Decorrentes do Evento Extremo de 2024 – Caxias do Sul/RS.....	78
Figura 40 -	Mapa de Cicatrizes x Classes de Suscetibilidade – Caxias do Sul/RS...83	
Figura 41 -	Mapa de Cicatrizes x Áreas Suscetíveis a Corrida de Massa, Escorregamento/Solapamento e Inundação.....	86
Figura 42 –	Mapa de cicatrizes em Áreas Urbanas - Galápolis.....	89
Figura 43 -	Mapa de Cicatrizes x Uso e Cobertura da Terra MapBiomias.....	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Número de cicatrizes de movimentos de massa por município ...	20
Gráfico 2 -	Nível do Rio Guaíba entre maio e dezembro de 2024	34
Gráfico 3 -	Diagrama de dispersão entre precipitação acumulada e precipitação diária e curvas de tendência de pluviosidades que desencadeiam deslizamentos	35
Gráfico 4 -	Efeito da infiltração da chuva na estabilidade: (a) seção analisada; (b) perfis de progressão; (c) variação do FS e precipitação (mm)	36
Gráfico 5 -	Precipitação mensal acumulada (mm) das Normais Climatológicas de Caxias do Sul/RS.....	57
Gráfico 6 -	Número de Cicatrizes por Classe de Suscetibilidade	80
Gráfico 7 -	Área de Cicatrizes (m ²) por Classe de Suscetibilidade	80
Gráfico 8 -	Número de Cicatrizes por Região de Suscetibilidade Específica.	84
Gráfico 9 -	Área de Cicatrizes (m ²) por Região de Suscetibilidade Específica.....	85
Gráfico 10 -	Número de Cicatrizes por Classificação de Uso e Cobertura da Terra.....	87
Gráfico 11 -	Área de Cicatrizes por Classificação de Uso e Cobertura da Terra.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Dados de Entrada	55
Quadro 2 -	Resumo do Quadro-Legenda A – Suscetibilidade a Movimentos de Massa.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação de duas normais climatológicas anuais do Rio Grande do Sul.....	33
Tabela 2 -	Número de cicatrizes, Área, Porcentagem de área atingida e Densidade de Cicatrizes.....	74
Tabela 3 -	Resumo de Dados Obtidos e Parâmetros Calculados – Cicatrizes Mapeadas	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACC	Área de Contribuição de Cada pixel
Acic	Área atingida pelas cicatrizes (km ²)
ADA	Área Diretamente Atingida
ANA	Agência Nacional de Águas
AR6	Relatório de Avaliação
Asub	Área total da sub-bacia (km ²)
CEPSRM	Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DC	Defesa Civil
Dcic	Densidade de cicatrizes
Ddc	Densidade de drenagem de cicatrizes
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	Agência Espacial Europeia
FS	Fator de Segurança
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GMES	<i>Global Monitoring for Environment and Security</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IGEO	Instituto de Geociências
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Lcic	Comprimento das cicatrizes (km)
LTR	<i>Long Term Release</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MG	Minas Gerais
MSI	<i>Multispectral Imager</i>

MUOS	Mapa de Uso e Ocupação do Solo
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma de Estabilidade de Encostas
Ncic	Número de cicatrizes
OLCI	<i>Ocean and Land Color Instrument</i>
PAA	Porcentagem de Área Afetada
PI	Plano de Informação
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
RS	Rio Grande do Sul
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SC	Santa Catarina
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLSTR	<i>Sea and Land Surface Temperature Radiometer</i>
SP	São Paulo
SR	Sensoriamento Remoto
TWI	<i>Topographic Wetness Index</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHT	Unidade Homogênea de Terreno
URBAM	Urbanizadora Municipal de Curitiba
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Definição do problema.....	21
1.3	Objetivo geral.....	21
1.4	Objetivos específicos.....	21
1.5	Estrutura do trabalho	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Movimentos de massa	20
2.1.1	Definições e conceitos.....	20
2.1.2	Classificação Dos tipos de movimentos de massa.....	22
2.1.2.1	Quedas	23
2.1.2.2	Escorregamentos	25
2.1.2.3	Rastejos.....	28
2.1.2.4	Corridas	29
2.1.3	Fatores que condicionam os movimentos de massa.....	31
2.2	Eventos de precipitação extrema.....	32
2.2.1	Definições e conceitos.....	32
2.2.2	Influência nos movimentos de massa.....	35
2.3	Sensoriamento remoto e geoprocessamento.....	37
2.3.1	Definições e conceitos.....	37
2.3.2	Imagens de satélite e o monitoramento ambiental.....	39
2.3.3	Utilização do SR para análise de suscetibilidade a movimentos de massa e ocorrência de eventos extremos.....	45
2.4	Mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa.....	48
2.4.1	Cartas de suscetibilidade.....	48
2.4.2	Mapas de uso e ocupação do solo	52
3	MÉTODO DE PESQUISA	53
3.1	Fluxograma	53
3.2	Área de estudo: Caxias do Sul/RS	55

3.2.1	Formação geológica da área de estudo.....	59
3.2.2	Carta de suscetibilidade da área de estudo	61
3.3	Elaboração de mapa de uso e ocupação do solo em software SIG.....	64
3.4	Retroanálise da carta de suscetibilidade	73
4	RESULTADOS.....	77
4.1	Mapa de Cicatrizes de Movimentos de Massa e Parâmetros Calculados	77
4.2	Retroanálise da Carta quanto às Classes de Suscetibilidade.....	77
4.3	Retroanálise da Carta quanto às Regiões de Suscetibilidade Específica	84
4.4	Análise das Áreas Atingidas com relação ao Uso do Solo.....	87
4.5	Acurácia da Carta de Suscetibilidade do Município.....	91
5	DISCUSSÕES E CONCLUSÃO.....	92
	ANEXOS.....	95
	ANEXO A - Carta síntese de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações de Caxias do Sul/RS.....	95
	ANEXO B - Quadro Legenda-A – Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa.....	96
	ANEXO C - Quadro Legenda-B – Suscetibilidade a Inundações.....	97
	APÊNDICES.....	98
	APÊNDICE A - Tabela de Dados das Cicatrizes Mapeadas.....	98
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

Conforme apontado no Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas (IPCC), as alterações climáticas provocadas pela ação humana influenciam diversos extremos meteorológicos em todas as regiões do planeta, resultando em amplos impactos negativos, com prejuízos tanto para o meio ambiente quanto para as populações (Team; Lee; Romero, 2023). No Brasil, Berlato e Cordeiro (2017) já apontavam que, no estado brasileiro do Rio Grande do Sul (RS), houve um aumento na precipitação anual em decorrência do aquecimento global. Os mesmos autores salientam que no intervalo de 1980 a 2009, essa precipitação anual apresentou crescimento de cerca de 10% em relação à média climática registrada entre 1950 e 1979 e ainda que, além do crescimento da precipitação anual e estacional, percebe-se também agravamento na intensidade média das chuvas anuais (mm/dia) e na frequência de eventos de precipitação diária intensa.

Nesse contexto, as chuvas extremas que inundaram o RS em 2024 trouxeram consequências catastróficas. Durante o período compreendido entre 26 de abril e 5 de maio daquele ano, as precipitações atingiram níveis excepcionais. Segundo Rocha, Reboita e Crespo (2024), o município de Segredo/RS, por exemplo, acumulou 812,6 mm neste intervalo de apenas 10 dias durante o evento extremo de 2024. Segundo as Normas Climatológicas de 1991 a 2020 apresentadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022), era esperada uma precipitação acumulada de 287mm em 61 dias entre os meses de abril e maio para esta localidade, o que demonstra ter ocorrido o equivalente a aproximadamente 280% da precipitação média de dois meses inteiros nesta época em situação normal. Este evento superou também o recorde histórico da cheia de 1941, quando o nível do rio Guaíba alcançou 4,76 metros em 8 de maio, enquanto em 2024 atingiu 5,35 metros, sendo que os valores referência de cota de alerta e inundação são de 3,15 m e 3,6 m, respectivamente, conforme Agência Nacional de Águas (ANA, 2024). O volume de chuva acumulado, além de causar inundações nas áreas diretamente atingidas, impactou também regiões ribeirinhas e marginais à Lagoa dos Patos, onde confluem as bacias hidrográficas do estado (Rocha; Reboita; Crespo, 2024).

Além de inundações, houve diversas ocorrências de escorregamentos e fluxos de detritos que atingiram as comunidades na Região dos Vales, ocasionando perdas animais e humanas e graves danos à infraestrutura urbana (Kobiyama *et al.*, 2024). O acidente gerou também grande prejuízo para a agropecuária, setor de grande relevância para a economia do RS, devido à destruição de lavouras e rebanhos. Segundo a Defesa Civil (DC) do RS (2024), este episódio foi um dos maiores desastres ambientais já registrados, resultando em 478 municípios afetados, 2.398.255 pessoas atingidas, 806 feridos, 27 desaparecidos e 183 óbitos confirmados. A taxa de municípios afetados chegou a cerca de 96% do Estado. A seguir, Figura 1 apresenta imagem disponibilizada pela prefeitura de Caxias do Sul da região de Galópolis, atingida por movimento de massa em zona urbana:

Figura 1 - Imagem aérea de Galópolis em 18 de maio de 2024



Fonte: Caxias do Sul (2024, *on-line*).

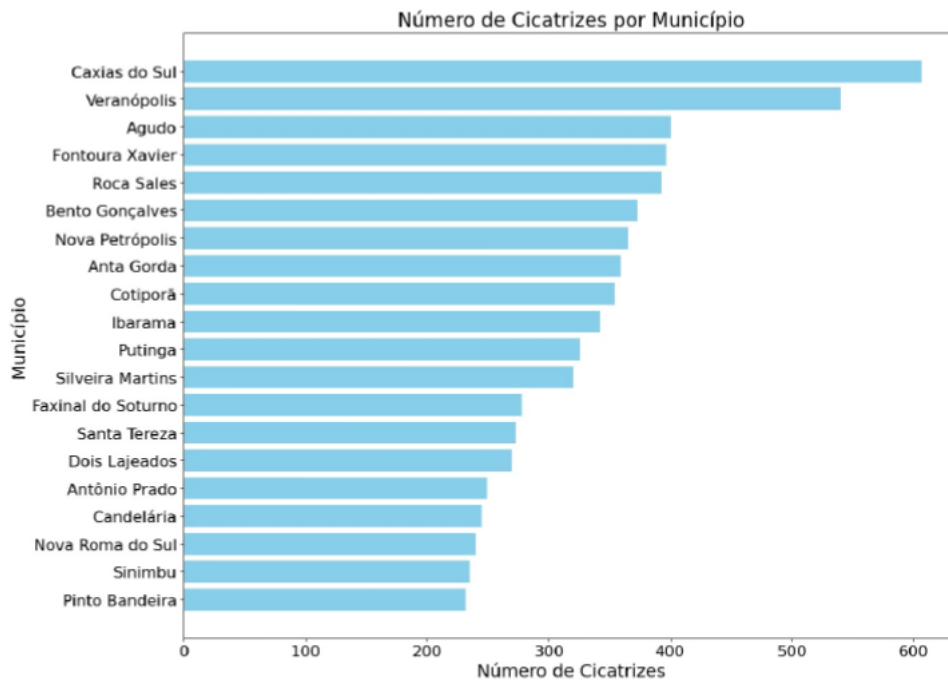
Neste cenário, fica evidente a importância de estudos que visam o mapeamento das regiões de risco e avaliam ameaças e vulnerabilidades a deslizamentos de terra e alagamentos. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações são documentos cartográficos elaborados em atenção a diretrizes da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) que buscam atingir estes objetivos (Bitar, 2014). Segundo Lana (2015), cartas de suscetibilidade são mapas detalhados que classificam áreas suscetíveis a inundações

e movimentos de massa, contribuindo para o planejamento urbano e a prevenção de desastres naturais. Esses documentos são produzidos pelo CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) - Serviço Geológico do Brasil (SGB) e baseiam-se em dados geológicos, topográficos e imagens de satélite, sendo fundamentais para regiões vulneráveis. É essencial que estes documentos estejam condizentes com o cenário atual, o que pode ser verificado após a ocorrência de novos acidentes.

Visto que eventos extremos tal como o ocorrido em 2024 no RS tendem a ser mais frequentes e intensos e, conhecendo a gravidade de suas consequências, analisar as cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação existentes das áreas atingidas é de extrema importância. Faz-se necessário confrontar a realidade dos novos fatos ao anteriormente mapeado. Portanto, com a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto, este trabalho propôs-se a comparar os movimentos de massa ocorridos com a previsão existente nas cartas de suscetibilidade da Região dos Vales, contida na Região Hidrográfica do Guaíba, mais especificamente no município de Caxias do Sul/RS.

1.1 Justificativa

Tendo em vista a magnitude das consequências sofridas pelo estado do RS após a ocorrência do evento extremo de precipitação de 2024, a importância da realização de pesquisas sobre este tema é inegável. A Região dos Vales do RS, que inclui o Vale do Jacuí, Vale do Rio Pardo, Vale do Taquari e Vale do Caí, incluídos na bacia hidrográfica do Guaíba, foi o maior foco do estado em relação a movimentos de massa. Neste contexto, o mapeamento das cicatrizes destes eventos decorrentes do acumulado de chuva entre 27/04 e 13/05 de 2024 foi divulgado em nota técnica conjunta realizada pelo Instituto de Geociências (IGEO) e Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (IGEO/CEPSRM, 2024). Conforme Gráfico 1 a seguir, o município que registrou maior quantidade de cicatrizes de movimentos de massa (607) foi Caxias do Sul.

Gráfico 1 - Número de cicatrizes de movimentos de massa por município

Fonte: IGEO/CEPSRM (2024, *on-line*).

Portanto, como o município de Caxias do Sul registrou alto número de cicatrizes em decorrência deste evento e possui carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações elaborada previamente ao ocorrido, este município será utilizado como base para a realização de estudo de caso para a análise comparativa entre os movimentos de massa ocorridos em relação à suscetibilidade anteriormente mapeada. Conforme aponta Bitar (2014), a importância deste tipo de revisão decorre do fato de que estas cartas apresentam uma classificação relativa que se baseia em um modelo de abordagem estatístico em desenvolvimento, ou seja, é possível que fatores não incluídos em um determinado período do desenvolvimento do modelo venham a ocorrer posteriormente e sejam determinantes para geração de novas previsões. O autor salienta que variações climáticas, por exemplo, podem resultar em alterações nas áreas de suscetibilidade previstas e que, após ocorrência de um novo evento extremo, é possível realizar a integração dos novos dados ao modelo.

1.2 Definição do problema

Já que, conforme definido por Bitar (2014), cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações são documentos que se fundamentam na potencialidade de ocorrência de desastres naturais de acordo com registros históricos disponíveis no país, as previsões podem apresentar um desvio em relação ao cenário real devido à evolução dos desequilíbrios ambientais e a alteração da frequência e intensidade das chuvas mencionada por Berlato e Cordeiro (2017).

As cartas de suscetibilidade são importantes para o mapeamento e a prevenção de acidentes, além de guiar o ordenamento territorial e promover o desenvolvimento urbano e do meio ambiente, promovendo o desenvolvimento sustentável no país (Bitar, 2014). Como as alterações climáticas interferem diretamente na magnitude dos eventos extremos, propõe-se a retroanálise dos movimentos de massa ocorridos com vistas a uma avaliação de acurácia da carta de suscetibilidade da área de estudo, Caxias do Sul/RS, após a grande quantidade de movimentos de massa registrados no evento extremo de 2024. Estes movimentos de massa ocorridos em decorrência do evento extremo estão condizentes com a previsão de regiões suscetíveis contidas na carta de suscetibilidade do município? Há, portanto, duas hipóteses a serem analisadas: a primeira é a de que sim, a carta de suscetibilidade de 2017 ainda é atual e condizente com os eventos extremos de precipitações; ou, a segunda hipótese é de que não, a carta de suscetibilidade do município não está condizente com os eventos extremos de precipitação e necessita ser atualizada.

1.3 Objetivo geral

Analisar a acurácia da carta de suscetibilidade do município de Caxias do Sul/RS após a ocorrência do eventos extremo de precipitação de 2024.

1.4 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

a) Mapear os movimentos de massa ocorridos entre abril e maio de 2024 no município através de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento;

b) Avaliar quantitativamente e qualitativamente as áreas de ocorrência de movimentos de massa comparando-as com as áreas suscetíveis previamente mapeadas na carta de suscetibilidade;

c) Avaliar a aplicabilidade da carta de suscetibilidade como ferramenta de previsão das regiões atingidas por movimentos de massa decorrentes do evento extremo de 2024.

1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura do presente trabalho é dividida nas seguintes seções:

- a) Introdução: Apresenta o tema, o contexto do problema e os objetivos do estudo, além de destacar a relevância da pesquisa no contexto dos desastres naturais e eventos extremos de precipitação;
- b) Revisão bibliográfica: Esta seção aborda conceitos fundamentais necessários para a elaboração desta pesquisa, portanto contém tópicos sobre movimentos de massa, eventos de precipitação extrema e sensoriamento remoto e geoprocessamento;
- c) Método da pesquisa: Descrição dos métodos utilizados para a coleta e análise de dados, incluindo a obtenção de imagens de satélite do *Sentinel-2*, a utilização de *software* QGIS para análise espacial e a integração de dados com as cartas de suscetibilidade;
- d) Resultados: Apresenta os dados e as análises realizadas, incluindo o mapeamento e quantificação das cicatrizes de movimentos de massa, a sua classificação em relação às classes de suscetibilidade, às regiões de suscetibilidade específica e aos diferentes tipos de uso e ocupação do solo;
- e) Discussões e Conclusão: Apresenta a discussão dos principais achados do estudo, avaliando a acurácia da carta de suscetibilidade do município em relação aos movimentos de massa ocorridos e destacando a importância da retroanálise e da atualização contínua dos mapeamentos para o aprimoramento do planejamento territorial e da gestão de riscos;

- f) Referências bibliográficas: Apresentação das fontes de pesquisa consultadas, incluindo livros, artigos acadêmicos e fontes digitais relacionadas ao tema do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta fundamentação teórica, são explorados os principais conceitos relacionados aos movimentos de massa, abrangendo desde definições básicas e classificações até os fatores que influenciam esses fenômenos. Inicialmente, são discutidos os movimentos de massa, incluindo quedas, escorregamentos, rastejos e corridas, cada um com suas características, causas e consequências distintas. Em seguida, o texto aborda o mapeamento de áreas suscetíveis a esses movimentos, destacando a importância das cartas de suscetibilidade e mapas de uso e ocupação do solo, fundamentais para a prevenção de desastres naturais. Além disso, são examinados os impactos das mudanças climáticas, especialmente os eventos de precipitação extrema, que afetam a estabilidade dos taludes e intensificam os riscos de escorregamentos. Por fim, aborda-se a utilização de tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento para estes fins, ferramentas eficazes para monitoramento e análise de áreas de risco, contribuindo para uma gestão ambiental segura.

2.1 Movimentos de massa

Neste tópico apresentam-se as definições e conceitos relacionados aos diferentes tipos de movimentos de massa abordados nesta pesquisa. Busca-se estabelecer uma base teórica sobre os processos envolvidos, suas classificações e fatores condicionantes, permitindo uma melhor compreensão destes tipos de evento.

2.1.1 Definições e conceitos

Segundo Wicander e Monroe (2009), movimentos de massa podem ser definidos como o deslocamento de solo e/ou rochas através de um talude, causado pela força da gravidade. Riffel, Guasselli e Bressani (2016) apontam que os movimentos de massa e as enchentes estão entre os desastres naturais mais recorrentes no mundo e, como existem diversos tipos de movimentos de massa, há dificuldade em realizar a correta identificação de qual movimento ocorreu em um determinado evento. Realizou-se uma revisão bibliográfica acerca dos tipos de

movimentos de massa mais comuns, suas causas e efeitos, com o objetivo de embasar a investigação deste trabalho.

De acordo com Gerscovich (2012), talude é definido como qualquer superfície inclinada presente em um maciço de solo ou rocha. Esses elementos podem ocorrer de forma natural, sendo conhecidos como encostas, ou podem ser originados por intervenções humanas, como no caso de aterros - barragens de terra, aterros rodoviários, cortes em terrenos, entre outros (Gerscovich, 2012). A seguir, a Figura 2 traz um exemplo de encosta na Serra do Mar, estado do Paraná, enquanto a Figura 3 apresenta um talude artificial, o Aterro Sanitário Municipal Joseense, São José dos Campos, São Paulo (SP).

Figura 2 - Encosta: Serra do Mar, Paraná



Fonte: LOBI (2022, *on-line*).

Figura 3 - Talude Artificial: Imagem do Aterro Sanitário Municipal Joseense, São José dos Campos/SP



Fonte: URBAM (2024, *on-line*).

Gerscovich (2012) salienta que taludes estão frequentemente expostos a problemas de estabilidade devido à atuação constante das forças gravitacionais, que favorecem o desencadeamento de movimentos. Mesmo encostas que permaneceram estáveis por longos períodos podem começar a se movimentar quando determinados fatores alteram o estado de tensões na massa do solo, gerando tensões cisalhantes que superam a resistência ao cisalhamento, resultando em instabilidade (Gerscovich, 2012). É importante destacar um dos parâmetros utilizados para determinar a estabilidade de taludes, o Fator de Segurança (FS) é determinado pela relação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento do solo. Quando $FS = 1$, o talude está em uma condição crítica, de ruptura iminente; já para valores de FS superiores a 1, o talude é considerado estável. De acordo com a Norma de Estabilidade de Encostas (NBR) 11682:2009 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), são estabelecidos limites mínimos admissíveis de FS (FS_{adm}), que variam conforme o tipo de obra, sua vida útil e os riscos envolvidos, como perdas humanas e materiais.

2.1.2 Classificação dos tipos de movimentos de massa

Os movimentos de massa abordados neste tópico incluem quedas, escorregamentos, rastejos e corridas. Cada um desses tipos possui características distintas em termos de dinâmica e impacto, sendo influenciados por fatores como a geologia local, a inclinação do terreno e as condições climáticas. A compreensão

detalhada desses fenômenos é importante para avaliar a estabilidade de taludes e identificar áreas de risco. Esta seção visa explorar as definições, causas, e consequências de diferentes tipos de movimento de massa.

2.1.2.1 Quedas

Caputo (1973) denomina este tipo de movimento de massa como desprendimentos de terra ou rocha e o caracteriza como o movimento rápido de queda livre de uma porção do maciço terroso ou de fragmentos rochosos, que se depositam no local atingido. Estes eventos são evitáveis por processos de prevenção como a utilização de recursos de estabilização (Caputo, 1973).

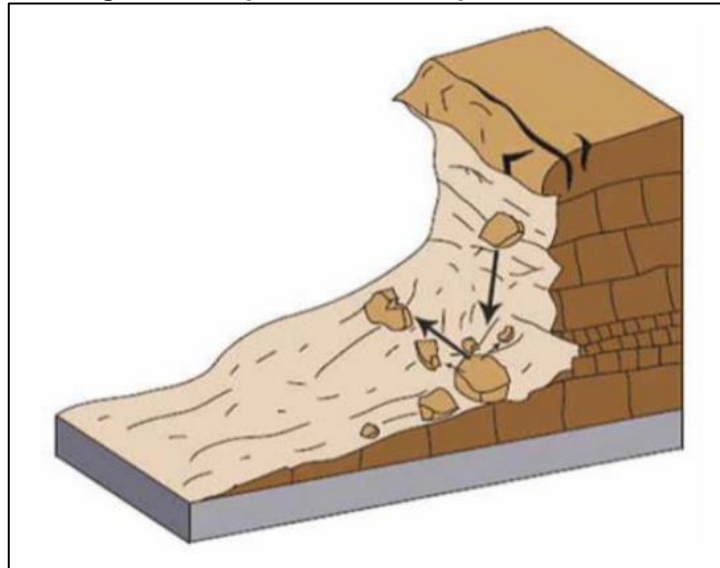
As quedas se dividem em dois grupos - queda de blocos e queda de detritos, a seguir caracterizadas:

Queda de blocos: Em penhascos verticais, ou taludes muito íngremes, blocos de rocha, deslocados do maciço por intemperismo, caem por ação da gravidade. Este é um dos mecanismos de formação de depósitos de tálus. Uma queda de blocos é assim definida por uma ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação. A queda pode ser combinada com outros movimentos, quais saltos, rotação dos blocos, ações de impacto no substrato, disso resultando uma fragmentação e uma diminuição de dimensão com o progresso da movimentação.

Queda de detritos: Trata-se de uma classe de importância menor, constituindo um termo de passagem entre a queda de blocos e os escorregamentos propriamente ditos. Pode ser definida como sendo a queda, relativamente livre, de reduzidas massas de fragmentos terrosos ou rochoso, inconsolidados, ou pouco consolidados, em movimentos de pequena magnitude. (Guidicini; Nieble, 1976, p. 42).

Uma representação de queda de blocos pode ser visualizada na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Representação de queda de blocos



Fonte: Highland e Bobrowski (2008, p. 10).

Em 2016, na cidade de Vila Velha, localizada na Grande Vitória, no estado do Espírito Santo, de acordo com o portal de notícias G1 (2016), 392 pessoas ficaram desabrigadas após a ocorrência de queda de blocos que atingiram edificações localizadas na encosta do Morro da Boa Vista. A Figura 5 a seguir mostra a área atingida:

Figura 5 - Queda de blocos em Vila Velha/ES em 2016



Fonte: G1 (2016, *on-line*).

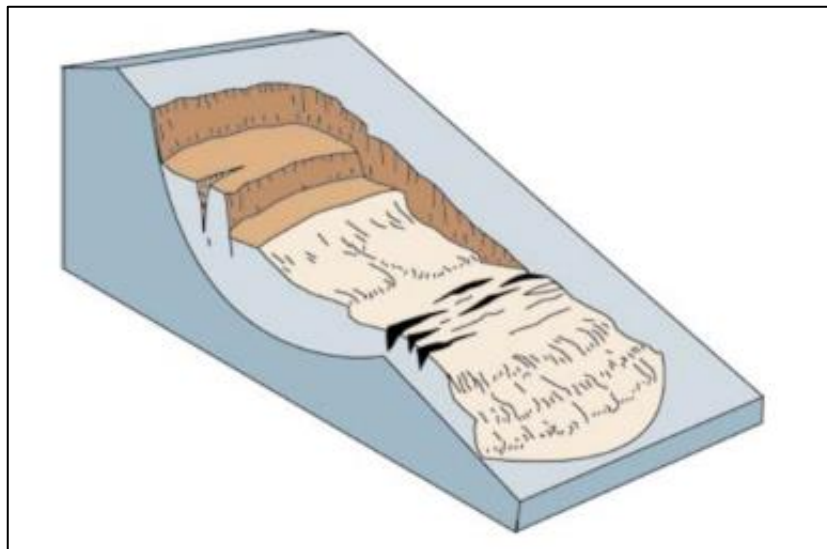
2.1.2.2 Escorregamentos

Queiroz (2018) explica que escorregamentos são os movimentos de massa que acontecem de maneira rápida e em um curto intervalo de tempo, ocorrendo ao longo de uma superfície de ruptura bem definida. A respeito das superfícies de ruptura e do deslocamento do material, Queiroz (2018, p. 273) aponta que:

Estas superfícies de escorregamento podem ser aproximadamente circulares, planas ou a combinação de ambas. O material instável pode escorregar e parar ainda sobre a superfície de ruptura, ou pode rotacionar e deslocar-se para pontos mais distantes da origem.

Conforme salienta Caputo (1973) quando o escorregamento ocorre por rotação, casos de solos coesivos e homogêneos, é denominado escorregamento rotacional. Os escorregamentos rotacionais ocorrem quando o material instável se desloca de forma curvada, com uma superfície de ruptura em arco, e geralmente acontecem de forma mais lenta (Caputo, 1973). Este tipo de movimento de massa está representado na Figura 6 a seguir:

Figura 6 - Representação de escorregamento rotacional

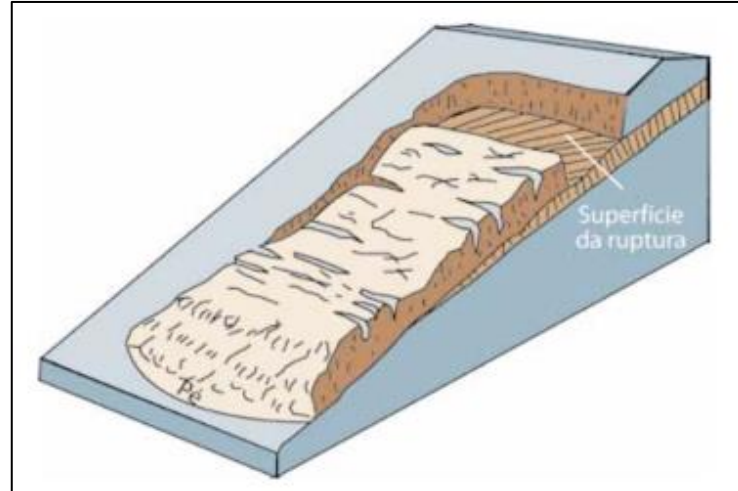


Fonte: Highland e Bobrowski (2008, p. 14).

Por outro lado, quando ocorre por translação, típico de maciços rochosos estratificados, é chamado escorregamento translacional, representado na Figura 7 a seguir. Os escorregamentos translacionais se caracterizam pelo deslocamento do

material de maneira linear ao longo de uma superfície de ruptura mais plana, sendo mais rápidos e devastadores (Guidicini; Nieble, 1976).

Figura 7 - Representação de escorregamento translacional



Fonte: Highland e Bobrowski (2008, p. 17).

Quando a superfície de ruptura cruza o topo ou a base do talude, o fenômeno é identificado como escorregamento superficial ou ruptura de talude. Por outro lado, caso a ruptura ocorra em uma região mais distante da base do talude, é classificada como escorregamento profundo (Caputo, 1973). Os escorregamentos superficiais apresentam velocidades geralmente mais elevadas, pois envolvem camadas menos espessas de solo e ocorrem rapidamente após a saturação do material (Varnes, 1978). Já os escorregamentos profundos são mais lentos, podendo evoluir ao longo de períodos prolongados devido à infiltração progressiva da água e ao desenvolvimento gradual da superfície de ruptura em profundidade (Highland e Bobrowsky, 2008).

Na Figura 8 a seguir, escorregamentos translacionais e rotacionais estão representados em imagens de ocorrências destes fenômenos no Brasil: escorregamento translacional em solo residual no Rio de Janeiro/RJ em 2010 (a) e escorregamento rotacional, ocorrido em Salvador/BA atingindo rodovia em 2005 (b):

Figura 8 - Fotografias de superfícies de escorregamentos: (a) translacional; (b) rotacional



Fonte: Gerscovich; Vargas; Campos, (2015, p. 615).

Segundo o IBGE (2010), 45,5% da população de Salvador vivia em áreas de risco para deslizamentos e alagamentos em 2010. A alta vulnerabilidade do município a deslizamentos (IBGE, 2010) ressalta a importância de estudos de retroanálise para o planejamento urbano. O escorregamento em Vila Canária ocorrido no ano de 2009 em Salvador exemplifica a necessidade de entender fatores de instabilidade para embasar diretrizes de uso do solo e mitigar riscos. A Figura 9 a seguir retrata tal escorregamento:

Figura 9 - Escorregamento ocorrido em Vila Canária, Salvador, em 2009

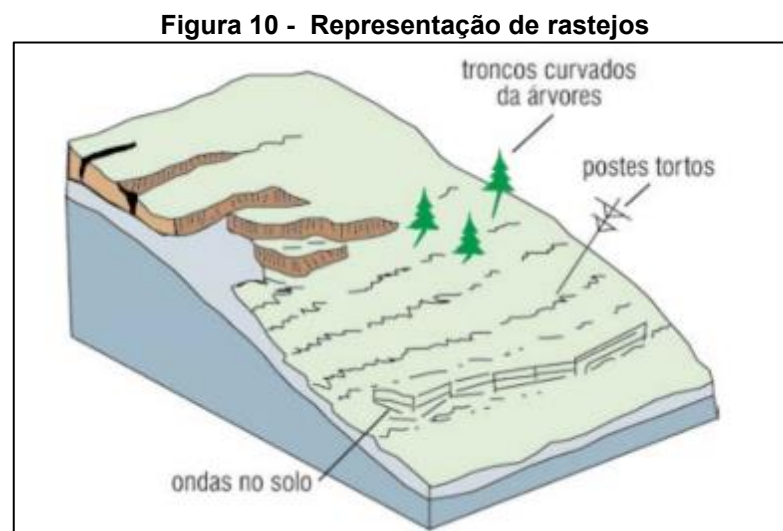


Fonte: Santos (2014, p.50).

2.1.2.3 Rastejos

Queiroz (2018, p. 271) caracteriza os movimentos de rastejo como aqueles “[...] com velocidades relativamente lentas de solos e/ou rochas em manto de intemperismo em encostas naturais ou taludes escavados, com superfícies-limite da base normalmente indefinidas.” Terzaghi (1953 *apud* Caputo, 1973) complementa que este tipo de movimento possui uma velocidade média de avanço de cerca de 30 cm por década, enquanto um escorregamento, por exemplo, possui velocidade média em torno de 30 cm por hora.

Os rastejos são causados pela aceleração da gravidade, porém há grande influência da variabilidade da temperatura e da umidade, o que causa a expansão e a contração do solo, causando, então, o movimento (Guidicini; Nieble, 1976). Guidicini e Nieble (1976) salientam também que, além da velocidade, outra diferença entre os rastejos e os escorregamentos é o fato de que os rastejos possuem um movimento que se assemelha ao de um líquido viscoso, enquanto os escorregamentos se comportam como um sólido que atingiu a tensão de cisalhamento. Evidências da ocorrência de rastejos podem ser percebidas através de árvores ou postes curvados na direção da encosta, assim como pela formação de degraus ou ondas no solo, como pode ser visualizado na Figura 10:



Fonte: Highland e Bobrowski (2008, p. 34)

Gonçalves (2014) analisou os rastejos ocorridos no Morro do Benjamin, em São José/SC em 2014, destacando a lenta movimentação do solo, provocada

principalmente por mudanças na temperatura e umidade. A Figura 11 a seguir demonstra a formação de degraus de rastejo, que facilitam o escoamento superficial da água da chuva. As setas na imagem indicam o provável trajeto da água em direção aos eixos de drenagem, seguindo um padrão semelhante à "espinha de peixe", o que ilustra o impacto do movimento do solo no processo de drenagem da encosta.

Figura 11 - Rastejos no Morro do Benjamin, São José/SC



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2014, p. 49).

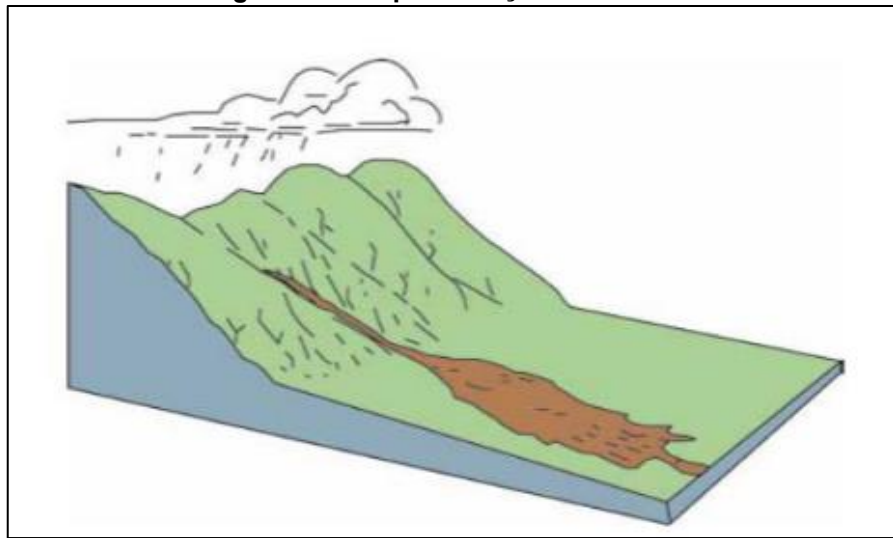
2.1.2.4 Corridas

Segundo Guidicini e Nieble (1976, p. 21), “corridas são formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno [...], em presença ou excesso de água”. Queiroz (2018) acrescenta que a consistência do solo é perdida e este flui como um líquido viscoso devido ao aumento da poropressão, o que diminui o atrito entre as partículas internas.

As corridas, também chamadas de fluxos, ocorrem principalmente em terrenos inclinados, como ravinas e cânions, sendo caracterizados por velocidades que podem atingir cerca de 60 km/h. A velocidade do deslocamento está associada à inclinação do talude e à consistência da massa transportada. Quando cessam, os

materiais formam depósitos cônicos ou triangulares, conhecidos como cones de detritos, nas bases dos taludes. Esses eventos têm alto potencial destrutivo, devido à sua velocidade, ao grande volume de sedimentos envolvidos e à capacidade de soterrar estruturas, veículos e edificações. Além disso, sua ocorrência é difícil de prever, o que aumenta o risco de fatalidades (Highland; Bobrowsky, 2008). A Figura 12 a seguir traz uma representação deste tipo de movimento de massa.

Figura 12 - Representação de corridas



Fonte: Highland e Bobrowski (2008, p. 24).

Segundo Rodrigues, Tupinambá e Amaral (2012), em janeiro de 2011, o Rio Vieira, na região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, mais especificamente o município de Teresópolis/RJ, apresentou uma série de corridas de massa. O evento deu-se em decorrência de picos de pluviosidade e caracterizou-se por um fluxo com grande carga de sedimentos rochosos. (Rodrigues; Tupinambá; Amaral, 2012). As consequências deste evento estão representadas na Figura 13 a seguir:

Figura 13 - Campo de futebol antes e depois das corridas do Rio Vieira



Fonte: Rodrigues, Tupinambá e Amaral (2012, p. 162).

2.1.3. Fatores que condicionam os movimentos de massa

Os movimentos de massa são fenômenos complexos influenciados por uma variedade de fatores. Guidicini e Nieble (1976) apontam que a infiltração de água no maciço decorrente da ação de chuvas é um dos principais agentes deflagradores dos escorregamentos. Os autores explicam que os escorregamentos acontecem quando “[...] a relação entre a resistência média ao cisalhamento do solo ou da rocha e as tensões médias de cisalhamento na superfície potencial de movimentação tenha decrescido de um valor inicial maior que 1 até a unidade [...].” (Guidicini; Nieble, 1976, p. 28).

Segundo Asevedo (2014), além da infiltração da água, a configuração geológica e a declividade do terreno também são aspectos cruciais para a ocorrência de deslizamentos. A saturação do solo aumenta a probabilidade de deslizamentos, especialmente em áreas de alta inclinação. A autora salienta que encostas íngremes com solos frágeis ou mal compactados apresentam uma vulnerabilidade maior, sendo propensas a deslizamentos quando submetidas à ação de chuvas intensas, que reduzem a coesão do solo e aumentam a pressão nas camadas superiores.

Wicander e Monroe (2009) complementam essa visão ao destacar a importância de fatores antropogênicos, como a ocupação desordenada do solo e a remoção da vegetação, que agravam a instabilidade dos terrenos. A urbanização descontrolada e a extração de recursos naturais nas encostas contribuem para o aumento da suscetibilidade a escorregamentos. A interação entre a ação humana e as condições naturais é, portanto, um fator determinante na gravidade e na frequência

dos deslizamentos. Esses fatores contribuem para a dinâmica dos movimentos de massa, sendo fundamentais para a compreensão dos processos que antecedem esses fenômenos e para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação.

2.2 Eventos de precipitação extrema

Para se compreender os eventos ocorridos na área de estudo proposta nos objetivos desta pesquisa, faz-se necessário compreender os conceitos acerca dos eventos de precipitação extrema, como ocorrem e como influenciam nos movimentos de massa.

2.2.1 Definições e conceitos

Segundo Petrucci e Azevedo (2023), eventos extremos de precipitação são definidos por episódios de chuvas cujos volumes precipitados se afastam significativamente da média histórica, sendo fenômenos naturais do sistema ambiental, mas que podem resultar em desastres. O IPCC (Team; Lee; Romero, 2023) define mudança climática como a alteração significativa a longo prazo nos valores médios ou na variabilidade destes valores que caracterizam o estado do clima. O AR6 do IPCC informa que as atividades humanas, principalmente por meio de emissões de gases de efeito estufa, têm contribuído cada vez mais com o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um aumento de 1,1°C entre em 2011-2020, quando comparado ao período de 1850-1900. O aumento das emissões globais de gases de efeito estufa aumentam progressivamente, tornando mais frequentes os eventos climáticos extremos (Team; Lee; Romero, 2023). A seguir, estas consequências estão exemplificadas, em tradução livre realizada pelo autor:

As mudanças climáticas causadas pelo homem já estão afetando muitos extremos climáticos e meteorológicos em todas as regiões do mundo. As evidências das mudanças observadas em extremos como ondas de calor, precipitações intensas, secas e ciclones tropicais e, em particular, sua atribuição à influência humana, se fortaleceram desde o AR5 (Team; Lee; Romero, 2023, p. 46).

Berlato e Cordeiro (2017) contribuem com dados que decorrem das mudanças climáticas no estado do RS, onde a precipitação pluvial anual média mostra

um aumento de 150 mm no período de 1980 a 2009 em relação à normal climatológica de 1950 a 1979, o que representa uma ampliação de cerca de 10%, conforme exposto na Tabela 1 a seguir, onde ficam evidenciados também os acréscimos nas temperaturas mínima, máxima e média, e diminuição da insolação, também decorrentes das mudanças climáticas advindas do aquecimento global:

Tabela 1 - Comparação de duas normais climatológicas anuais do Rio Grande do Sul

Elemento	1950-1979	1980-2009	Diferença
meteorológico			
Precipitação pluvial (mm)	1.522	1.672	150 (+10%)
Temp. mínima (°C)	13,5	13,9	0,4 (+3%)
Temp. máxima (°C)	23,8	24,0	0,2 (+0,8%)
Temp. média (°C)	18,5	18,8	0,3 (+1%)
Insolação (horas)	2.377	2.226	-151 (-6,4%)

Fonte: Adaptado de Cordeiro (2010 *apud* Berlato e Cordeiro, 2017, p. 297).

Estes autores salientam também um fato importante para o estudo de eventos extremos e suas consequências – além do acréscimo da precipitação pluvial anual e estacional, percebe-se o aumento da intensidade média das precipitações (mm/dia), assim como o aumento da ocorrência de precipitações diárias intensas (Berlato; Cordeiro, 2017). O evento extremo de chuvas entre abril e maio de 2024 no RS é um exemplo disto.

Rocha, Reboita e Crespo (2024) corroboram com Berlato e Cordeiro (2017) e o IPCC (Team; Lee; Romero, 2023) ao apontar que eventos extremos tem sido cada vez mais frequentes no estado e acrescentam que os eventos de precipitação extrema ocorrem muitas vezes associados a diferentes sistemas atmosféricos. As autoras salientam que o caso de abril e maio de 2024 teve influência de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) subtropicais que se desenvolveram em decorrência das condições do vento (Rocha; Reboita; Crespo, 2024). O seguinte trecho resume as diferentes causas do evento extremo em questão apontados pelas autoras:

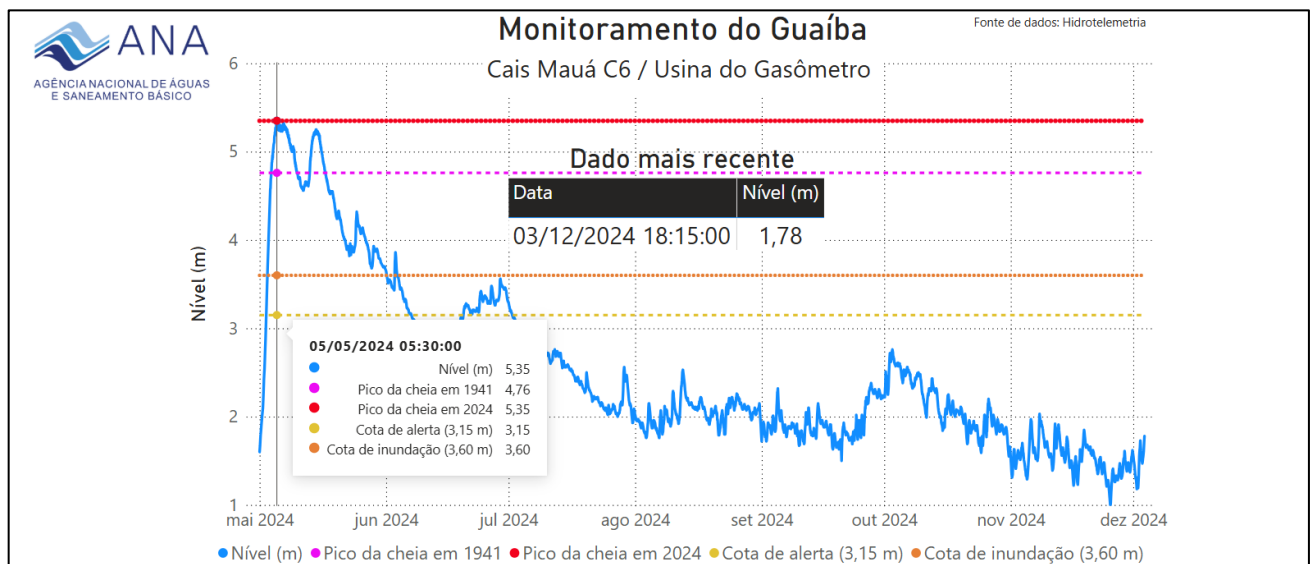
A chuva ocorrida nesse Estado foi propiciada por uma junção de sistemas atmosféricos: em grande escala um padrão de teleconexão com fonte no oceano Índico (a ser futuramente estudado em maiores detalhes) favoreceu o padrão anômalo de alta pressão sobre o centro-sudeste do Brasil. Em altos níveis esse padrão contribui para aumentar a velocidade dos ventos de oeste (jato subtropical) e em superfície os ventos de Norte-Noroeste (jato de baixos níveis a leste dos Andes). Esses sistemas de escala sinótica, por sua vez, propiciaram levantamento do ar sobre o Estado e formações de sistemas

convectivos de dimensões menores. Ademais, a passagem da frente fria no dia 28 de abril também teve contribuição para as chuvas que assolaram o Estado (Rocha; Reboita; Crespo, 2024, p. 6-7).

Rocha, Reboita e Crespo (2024) trazem como exemplo a grande discrepância entre o acumulado de chuva ocorrido em municípios da região Centro-Norte entre 26 de abril a 05 de maio de 2024 e o esperado para os meses de abril e maio de acordo com as Normais Climatológicas de 1991 a 2020, que seria 287 mm para estas localidades, conforme o INMET (2022). Os municípios Segredo, Fontoura Xavier e Lagoa Bonita atingiram um acumulado de 812,5; 778,0 e 749,2 mm, respectivamente, ou seja, em 10 dias o acumulado de chuvas atingiu 280% do que era esperado para 61 dias (Rocha; Reboita; Crespo, 2024).

Conseqüentemente, o recorde histórico de cheia de 1941 foi ultrapassado neste ano. Segundo a ANA (2024), durante o evento de precipitação extrema de 2024, o nível do Rio Guaíba atingiu 5,35m, enquanto em 1941 o valor atingido foi de 4,76m. Vale ressaltar que os valores referência de cota de alerta e inundação são de 3,15 m e 3,6 m, conforme pode ser percebido no Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 - Nível do Rio Guaíba entre maio e dezembro de 2024



Fonte: ANA (2024, on-line).

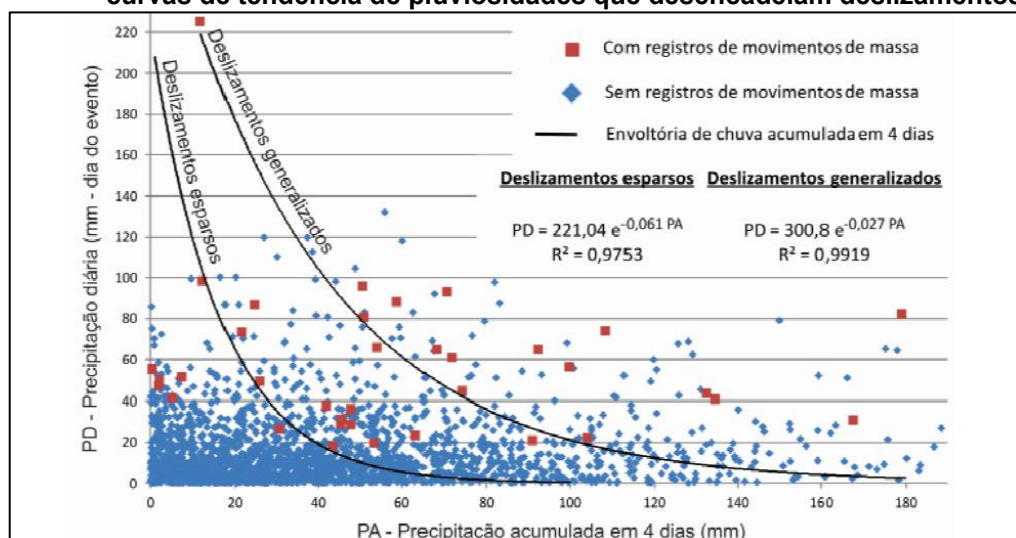
Frente a este cenário crítico no qual eventos extremos se tornam cada vez mais frequentes e intensos, Berlato e Cordeiro (2017) indicam que adaptação e mitigação são as palavras de ordem que devem nortear o caminho para enfrentar as mudanças climáticas que estão ocorrendo ao redor do mundo. Conforme aponta o

AR6, as opções de adaptação que são viáveis e eficazes atualmente se tornarão limitadas e menos eficazes com o aumento do aquecimento global (Team; Lee; Romero, 2023). É essencial que a má adaptação seja evitada por meio do planejamento e da implementação de ações de adaptação flexíveis, multissetoriais, inclusivas, com benefícios adicionais para muitos setores e sistemas (Team; Lee; Romero, 2023).

2.2.2 Influência dos eventos de precipitação extrema nos movimentos de massa

Segundo Lana e Montandon (2018), em eventos de chuvas intensas, a água exerce papel fundamental como agente desencadeador dos movimentos de massa. Os autores apontam que acumulados pluviométricos superiores a 30 mm ao longo de quatro dias podem ser suficientes para ocasionar movimentos de massa esparsos, em dias com chuvas entre 20 e 40 mm. Por outro lado, episódios de precipitação intensa, entre 40 e 60 mm em um único dia, têm potencial para provocar deslizamentos mesmo quando o volume acumulado nos quatro dias anteriores é inferior a 10 mm. Esses dados demonstram que a ocorrência de movimentos de massa não está restrita a chuvas prolongadas, podendo também ser desencadeada por precipitações de alta intensidade em períodos muito curtos tais como as ocorridas em eventos extremos de precipitação. Tais informações podem ser visualizadas no Gráfico 3 a seguir:

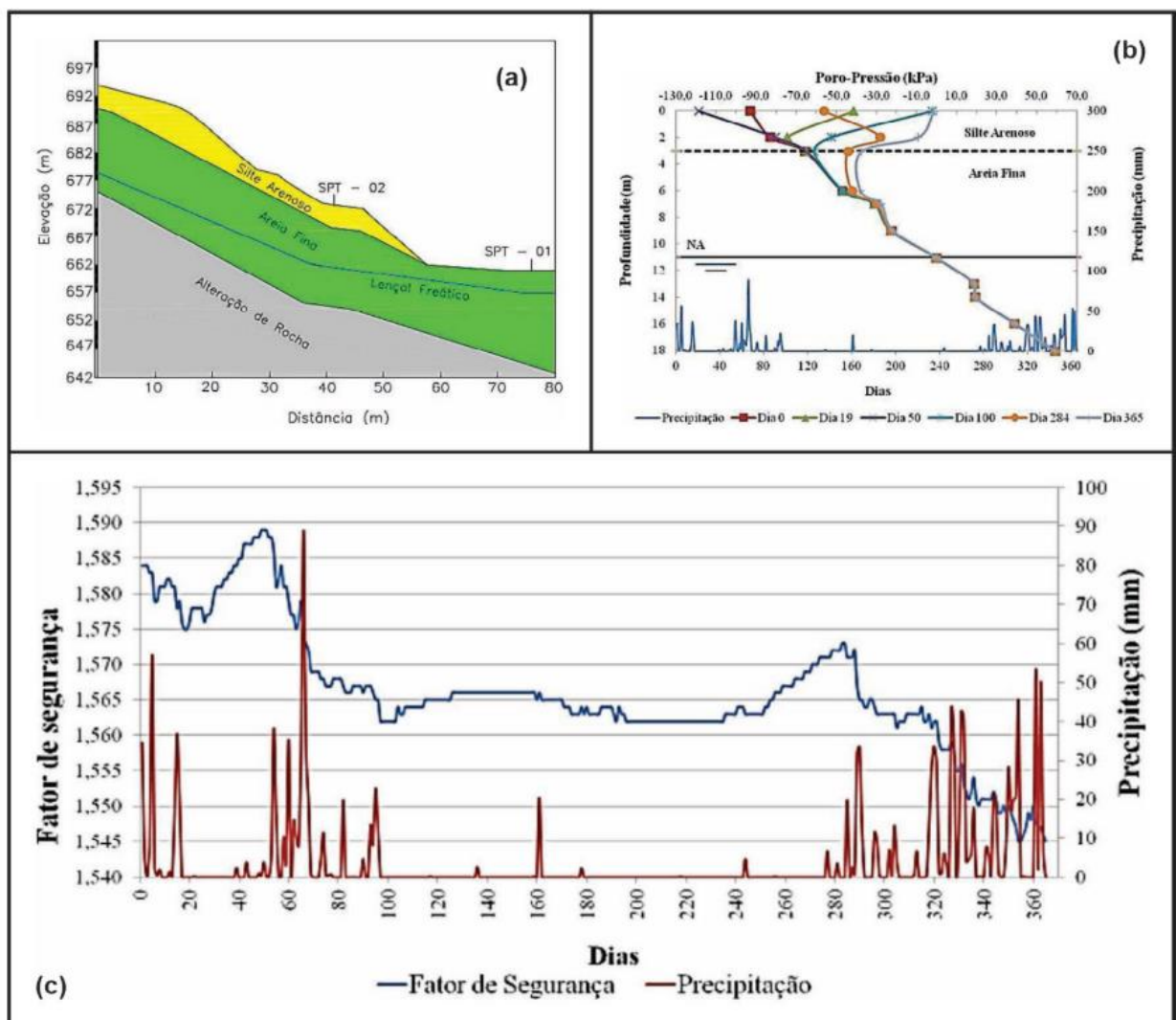
Gráfico 3 - Diagrama de dispersão entre precipitação acumulada e precipitação diária e curvas de tendência de pluviosidades que desencadeiam deslizamentos



Fonte: Lana e Montandon, (2018).

Queiroz (2018) aponta que o escoamento e a infiltração da água na superfície dependem de uma série de fatores, como: a permeabilidade do solo ou rocha, a existência ou não de cobertura vegetal na encosta, o gradiente topográfico (inclinação do terreno) e a ocupação do solo (zonas de impermeabilização). Neste assunto, Gerscovich (2012) contribui com um exemplo da interação entre a infiltração da água da chuva e a estabilidade de taludes que é apresentado no Gráfico 4, que ilustra o monitoramento, ao longo de um ano, das chuvas e das mudanças nos perfis de poropressão. Observa-se que o FS varia em função dos eventos pluviométricos e da redistribuição de poropressão (Gerscovich, 2012).

Gráfico 4 - Efeito da infiltração da chuva na estabilidade: (a) Seção analisada; (b) Perfis de poropressão; (c) Variação do FS e Precipitação (mm)



Fonte: Teixeira *et al.* (2015 *apud* Gerscovich, 2016).

Pode-se perceber pelo gráfico (c) que, quando há aumento na intensidade da precipitação, este é seguido pela diminuição do FS, o que demonstra que, de fato, eventos pluviométricos contribuem negativamente para a estabilidade das encostas. Gerscovich (2012) corrobora com Queiroz (2018) ao salientar que a taxa de infiltração nem sempre corresponde à intensidade da chuva que atinge o talude, sendo influenciada por fatores como condutividade hidráulica, inclinação, cobertura do solo e fluxo superficial. Logo, eventos extremos são especialmente desencadeadores de movimentos de massa tendo em vista a grande intensidade de precipitação e sua influência no fator de segurança.

2.3 Sensoriamento remoto e geoprocessamento

Nesta pesquisa analisou-se a área de estudos a partir de imagens de satélite e, portanto, faz-se necessário destacar os conceitos acerca de sensoriamento remoto (SR) e geoprocessamento necessários para a produção de mapas temáticos.

2.3.1 Definições e conceitos

Ao longo da história, a observação e a representação da superfície terrestre desempenharam um papel fundamental na organização e no progresso das sociedades. Informações básicas, como a distribuição espacial de recursos naturais, infraestruturas existentes e população, sempre foram essenciais para planejar e direcionar o desenvolvimento regional (Rosa, 2013). As ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto atualmente são indispensáveis para monitorar a dinâmica de uso e ocupação do solo, oferecendo rapidez no processamento, atualização frequente dos dados e viabilidade econômica (Vaeza *et al.*, 2010). A Figura 14 a seguir representa uma composição de imagens obtidas a partir do satélite *Sentinel-2* da região de Florianópolis/SC, em escala 1:100.000, 10 m de resolução, em Cor Verdadeira (composição *RGB*).

Figura 14 - Composição de imagens geradas pelo satélite *Sentinel-2* de Florianópolis/SC



Fonte: Engesat (2025, *on-line*).

O sensoriamento remoto pode ser dividido em duas etapas principais: a primeira envolve a aquisição de dados, que inclui os processos de detecção e registro das informações. A segunda etapa está relacionada à análise e utilização desses dados, englobando o tratamento e a extração das informações obtidas (Rosa, 2013).

Segundo Santos e Petronzio (2011), fontes de dados de sensoriamento remoto são diversas e abrangem desde imagens ópticas, adquiridas por satélites como *Sentinel-2*, até imagens de radar, como as obtidas pelos satélites da série *Synthetic Aperture Radar* (SAR) - Radar de Abertura Sintética. As imagens ópticas são sensíveis à reflexão da luz solar e são muito utilizadas para mapeamento de uso e ocupação do solo, como destacado por Santos e Petronzio (2011). Já os dados obtidos por radar (os quais obtêm dados da superfície a partir de outros comprimentos de onda do espectro eletromagnético) são capazes de penetrar em nuvens e vegetação, sendo úteis para monitoramento de desastres naturais e mapeamento de áreas com cobertura vegetal densa (Rosa, 2013).

Carminato, Leite e Pamboukian (2014) citam que, de maneira geral, as imagens são obtidas a partir de diferentes bandas. Estas bandas são determinadas conforme o comprimento de onda de cada sensor e a escolha das combinações das mesmas deve ser feita conforme o tipo de estudo a ser desenvolvido e as características da superfície terrestre que precisam ser evidenciadas, como áreas de água, queimadas, usos do solo, entre outras. É possível realizar a combinação de diferentes bandas, tal como a combinação 4-3-2 para o canal RGB (*Red, Green, Blue*),

que é utilizada para a geração de cenas coloridas no padrão Cor Verdadeira (*True Color*).

De acordo com a *National Aeronautics and Space Administration* - Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA, 2023), sensores orbitais, instalados em satélites imageadores, são capazes de monitorar grandes áreas de forma eficiente e contínua, fornecendo dados geoespaciais valiosos para diferentes aplicações, incluindo o monitoramento ambiental. O uso de satélites como o *Landsat* e o *Sentinel-2*, por exemplo, tem sido amplamente explorado para capturar imagens detalhadas da superfície terrestre em várias bandas espectrais, ajudando a mapear mudanças na paisagem, uso da terra e outros fenômenos naturais. Já os sensores não orbitais são instalados em plataformas terrestres, aéreas ou veiculares, como drones e aviões. Eles permitem a coleta de dados detalhados em áreas específicas, oferecendo alta resolução, mas com cobertura limitada. São úteis em estudos locais e investigações de campo, complementando os sensores orbitais (NASA, 2023).

Ainda conforme a NASA (2023), as resoluções dos sensores orbitais impactam diretamente na qualidade dos dados gerados. A resolução espacial define a clareza com que os objetos são representados nas imagens, enquanto a resolução temporal indica a frequência com que a mesma área é revisitada pelos satélites, afetando a capacidade de monitoramento contínuo. Além disso, a resolução espectral permite distinguir diferentes tipos de superfícies e materiais, enquanto a resolução radiométrica determina a precisão na detecção das variações de intensidade da radiação (NASA, 2023). No desenvolvimento deste trabalho, o foco foi dado aos satélites imageadores devido à sua capacidade de fornecer dados amplamente acessíveis e de alta qualidade para a análise de fenômenos ambientais, como deslizamentos de terra e outras alterações geológicas, com base nas características dessas resoluções, a fim de se identificar e mapear as cicatrizes de movimentos de massa.

2.3.2 Imagens de satélite e o monitoramento ambiental

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Territorial (2018), os satélites da série *Sentinel*, lançados a partir de 2014,

foram desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA) no âmbito do Programa *Copernicus*, com o objetivo de monitorar recursos naturais, uso do solo, ambientes marinhos, clima e desastres naturais. A EMBRAPA Territorial descreve que a missão, inicialmente denominada *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) - Monitoramento Global para o Meio Ambiente e a Segurança, foi renomeada para *Sentinel* em 2012. Esta missão é formada por pares de satélites especializados em diferentes áreas de interesse. Os satélites *Sentinel-1* utilizam sensores de radar e são voltados para o monitoramento terrestre e oceânico. O par *Sentinel-2* foi projetado para acompanhar vegetação, solos e regiões costeiras, equipado com sensores ópticos de alta resolução espacial. A terceira série, destinada ao monitoramento marinho, conta com sensores ópticos e radares específicos para essa finalidade. Já as séries 4 e 5 são direcionadas à análise da qualidade do ar.

A EMBRAPA Territorial (2018) descreve em mais detalhes os sistemas sensores presentes nos satélites da série *Sentinel*, que possuem diversas resoluções e aplicações. O *Sentinel-1A* e o *Sentinel-1B* são equipados com o sensor SAR, que opera na banda C (3,8 – 7,5 cm) e é capaz de obter imagens tanto diurnas quanto noturnas, com uma resolução espacial de 5 metros e resolução radiométrica de 10 bits. Esse radar é usado para monitoramento terrestre e oceânico, sendo altamente eficaz em condições atmosféricas adversas (EMBRAPA Territorial, 2018).

Conforme o autor supra citado, o *Sentinel-2A* e o *Sentinel-2B* são satélites ópticos com o sensor *Multispectral Imager* (MSI) - Imager Multiespectral, que oferece 13 bandas espectrais com resoluções de 10m (visível), 20m (infravermelho) e 60m (correção atmosférica). Este sensor é utilizado para monitoramento de agricultura, florestas, zonas costeiras e desastres naturais associados a movimentos de massa e inundações. Já os satélites *Sentinel-3A* e o *Sentinel-3B* são equipados com os sensores *Ocean and Land Color Instrument* (OLCI) - Instrumento de cor do oceano e da terra e *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) - Radiômetro de temperatura da superfície do mar e da terra). O OLCI mede a radiação solar refletida pela Terra em 21 bandas espectrais (400 nm a 1.040 nm) com resolução espacial de 300m, aplicando-se ao monitoramento de uso do solo, áreas oceânicas e atmosfera. O SLSTR, por sua vez, mede a temperatura da superfície terrestre (com resolução de 500m para visível e infravermelho, e 1 km para a região térmica) e é utilizado para monitoramento climático e meteorológico (EMBRAPA Territorial, 2018).

Carminato, Leite e Pamboukian (2014) ilustram a diferença entre diferentes resoluções espaciais na Figura 15. De forma crescente, as imagens exibem resoluções de 30m, 10m e 1m. Na imagem com resolução de 30m por pixel (mais à esquerda), não é possível identificar detalhes como ruas e casas. No entanto, conforme a resolução aumenta, a imagem se torna mais nítida, permitindo a identificação clara de cada elemento.

Figura 15 - Imagens com resolução espacial de 30m, 10m e 1m



Fonte: Carminato, Leite e Pamboukian (2014, p. 3).

A integração do sensoriamento remoto com as ferramentas de geoprocessamento permite a análise espacial de grandes volumes de dados, facilitando a identificação de padrões, tendências e relações entre diferentes variáveis ambientais. A utilização de *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) permitem o processamento e a visualização, análise e modelagem de dados geográficos (Vaeza *et al.*, 2010).

A seguir, Rosa (2013, p. 67), traz um resumo detalhado sobre SIG:

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG), como já definido anteriormente, é um sistema destinado à entrada, armazenamento, manipulação, análise e visualização de dados geográficos ou espaciais (gráficos e/ou imagens). Esses dados são representados por pontos, linhas e polígonos aos quais são associados atributos, isto é, características das feições que os pontos, linhas e polígonos representam. Por exemplo, o ponto pode representar locais com risco de desertificação. A linha pode representar estradas, rios ou outras feições lineares; já o polígono pode representar feições areais tais como tipos de vegetação, uso da terra etc.

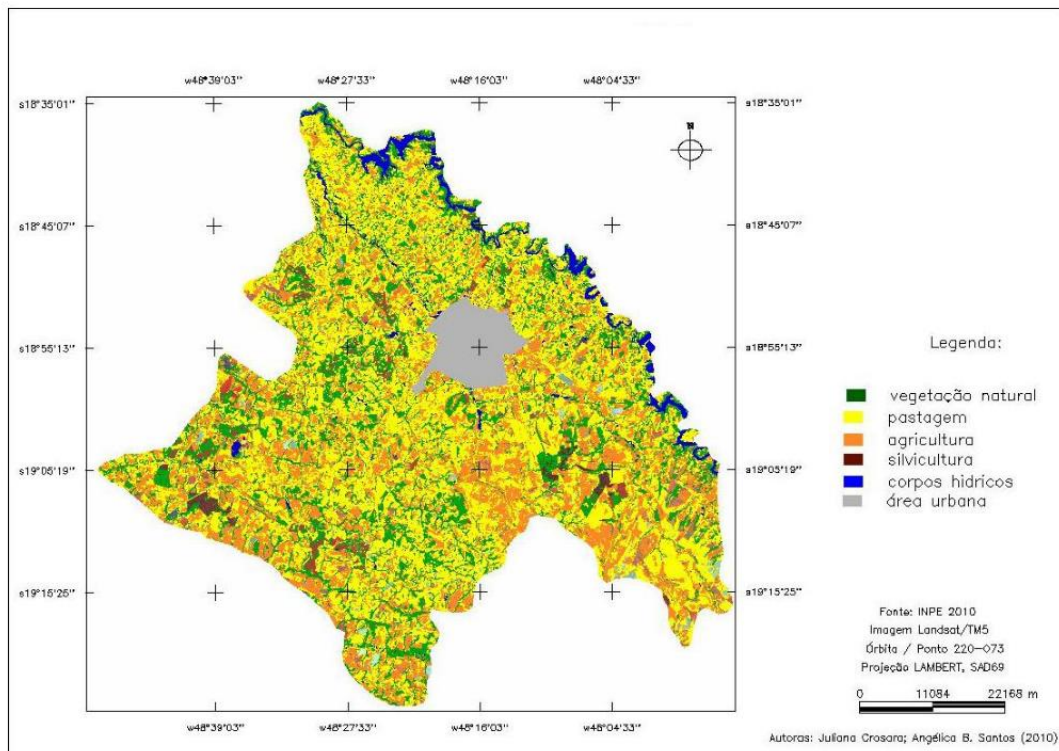
Conforme apontam Carminato, Leite e Pamboukian (2014), no contexto dos SIGs, os dados geográficos são organizados em camadas ou níveis de informação (*layers*). Cada camada é composta por um conjunto de objetos e seus atributos associados, permitindo que informações sejam relacionadas por meio da posição e topologia dos objetos, possibilitando a geração de novas informações. Para que essas

camadas possam ser sobrepostas, eles necessitam estar georreferenciadas no mesmo sistema de coordenadas e projeção cartográfica (Carminato; Leite; Pamboukian, 2014).

Carminato, Leite e Pamboukian (2014) apontam também que os elementos geográficos são divididos em duas componentes: a componente gráfica ou espacial, que contém localização, geometria, área, perímetro e forma; e a componente não gráfica ou não espacial, que se apresenta em tabelas ou bancos de dados. A representação gráfica pode ser realizada de forma vetorial, com pontos, linhas e polígonos, ou matricial (*raster*), onde o terreno é descrito por uma matriz de *pixels*, cada qual contendo valores que representam um diferente atributo específico (Carminato; Leite; Pamboukian, 2014).

Para se ter uma ideia do emprego destas imagens, Santos e Petronzio (2011) elaboraram um mapeamento do Uso da Terra de Uberlândia, Minas Gerais (MG), com enfoque na classificação de áreas de vegetação natural, pastagem, agricultura, silvicultura, corpos hídricos e área urbana. Para isto, os autores utilizaram imagens óticas do satélite TM/Landsat-5, disponíveis pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Posteriormente, realizaram o processamento a partir do *software* SIG *Spring* 5.1, obtendo o mapa de uso e ocupação do solo a seguir (Figura 16) onde, os polígonos nele desenhados representam as classes: vegetação, pastagem, agricultura, silvicultura, corpos hídricos e área urbana.

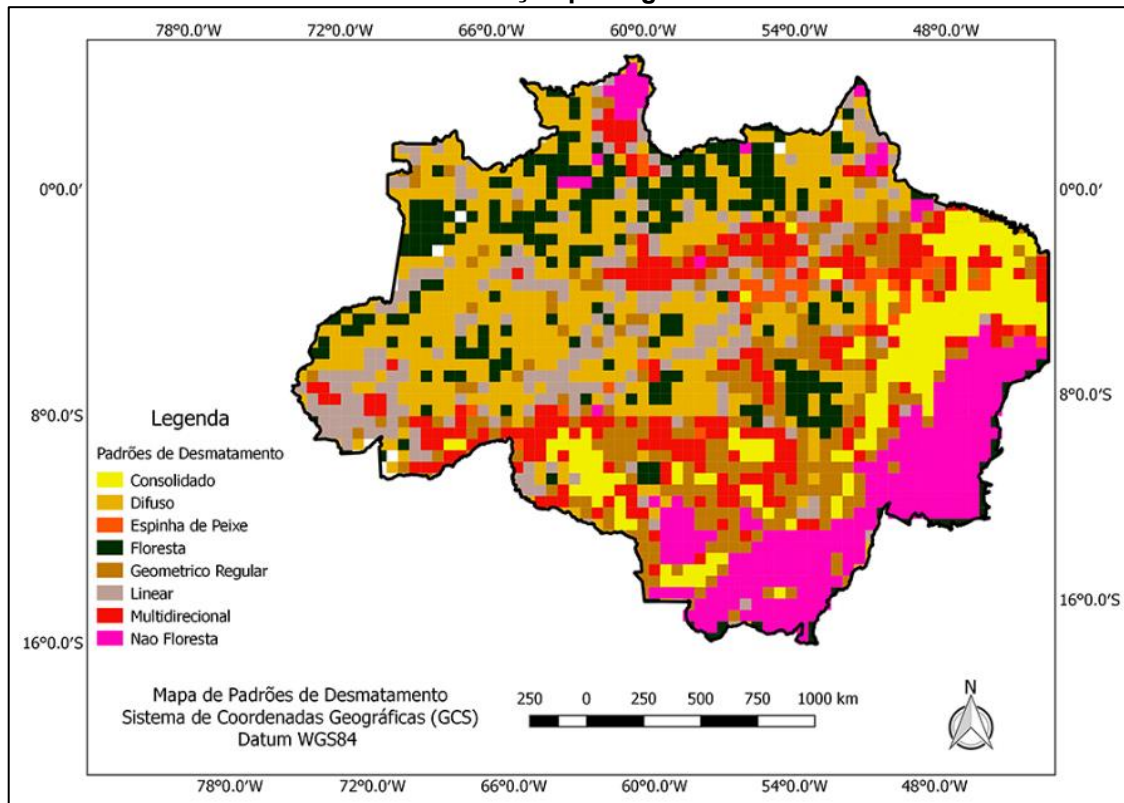
Figura 16 - Mapa de uso e ocupação do solo de Uberlândia/MG



Fonte: Santos e Petronzio (2011, p. 6190).

Já o mapa construído a partir de imagens dos satélites *Sentinel*, *Landsat* e *RapidEye*, representado na Figura 17 a seguir, apresenta os padrões de desmatamento na Amazônia Legal, conforme descrito por Maurano, Escada e Renno (2019). A visualização desses padrões é crucial para a avaliação da intensidade e localização do desmatamento, oferecendo requisitos valiosos para o monitoramento e a formulação de políticas públicas de conservação ambiental. A pesquisa destes autores também avalia a eficácia dessas ferramentas no monitoramento da cobertura florestal. Os padrões de desmatamento foram obtidos a partir do algoritmo de árvore de decisão C5.0 em *software* SIG TerraView, desenvolvido pelo INPE.

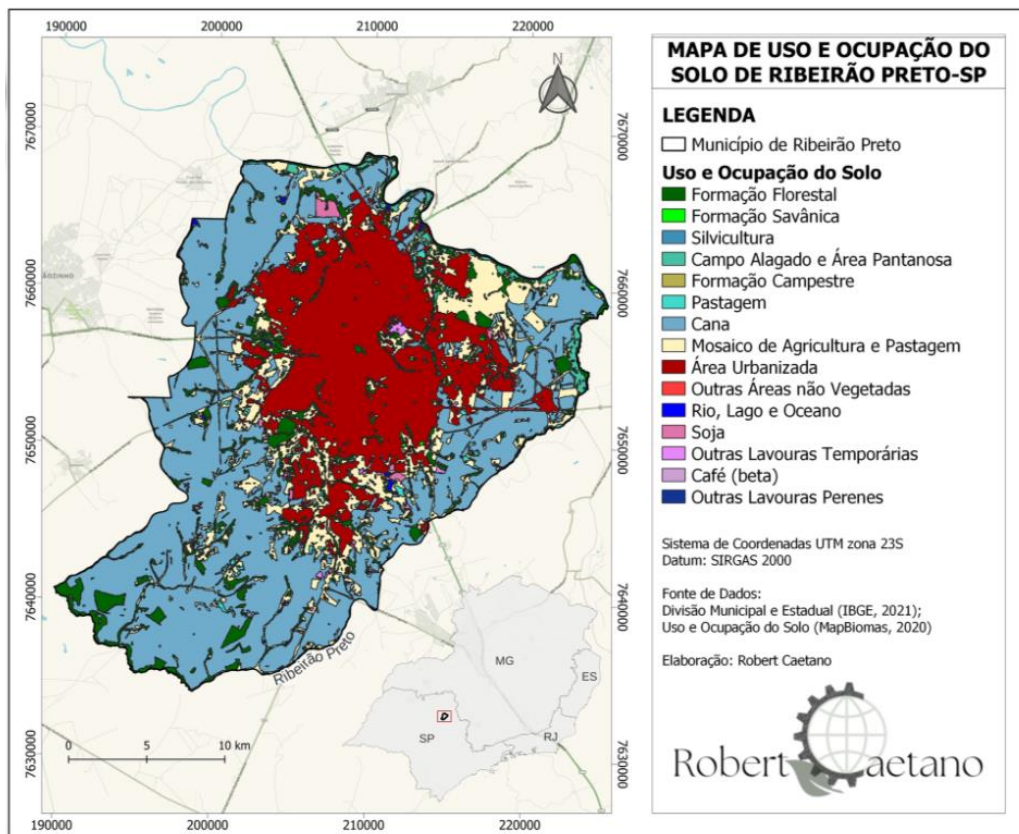
Figura 17 - Mapa de padrões de desmatamento da Amazônia Legal a partir de processo de classificação por algoritmo



Fonte: Maurano, Escada e Renno (2019, p. 1770).

Outro exemplo de utilização das imagens de satélite está representado na Figura 18 a seguir. Trata-se do mapa de uso e ocupação do solo do município de Ribeirão Preto, pertencente ao estado de São Paulo para o ano de 2020, que foi elaborado com a utilização do *software* QGIS. Nele constam as classes que indicam os diferentes usos do solo, o que possibilita analisar-se que há predominância das classes de área urbanizada e plantação de cana de açúcar, para o ano de 2020.

Figura 18 - Mapa de uso e ocupação do solo de Ribeirão Preto/SP



Fonte: Caetano (2022, *on-line*).

2.3.3 Utilização do SR para análise de suscetibilidade a movimentos de massa e ocorrência de eventos extremos

Vaeza *et al.* (2010) apontam que o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta poderosa para o mapeamento de áreas de risco a movimentos de massa. Ao analisar imagens de satélite, é possível identificar áreas com alta declividade, solos instáveis e ocupação do solo inadequada, que são fatores que contribuem para a ocorrência de deslizamentos. Essa abordagem permite a criação de mapas de suscetibilidade, que são fundamentais para o planejamento territorial e a gestão de riscos (Vaeza *et al.*, 2010).

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento oferecem diversas vantagens para a análise de suscetibilidade a movimentos de massa e eventos extremos. A capacidade de coletar dados de forma rápida e eficiente em grandes áreas, aliada à possibilidade de realizar análises complexas, torna essas técnicas

essenciais para o monitoramento de desastres naturais e a avaliação dos impactos ambientais (Rosa, 2013).

A utilização de tecnologias de sensoriamento remoto e georreferenciamento viabiliza a elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações decorrentes de eventos extremos de precipitação, descrita no método da carta de suscetibilidade desenvolvido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2014, em parceria ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e descrita por Bitar (2014). Segundo Bitar (2014), estas tecnologias permitem a integração de grandes volumes de dados espaciais e não espaciais. O processo compreende a elaboração de mapas temáticos e a estruturação de bases de dados digitais, que incluem informações como curvas de nível, pontos cotados, hidrografia, limites municipais e estaduais, sistema viário, áreas urbanizadas, e ortofotos (imagens de satélite em escala uniforme). Esses dados são organizados em diretórios específicos: o diretório "Base" contém os dados planialtimétricos e topográficos, enquanto o diretório "Produtos" reúne os dados desenvolvidos, como Modelos Digitais de Elevação (MDEs), feições geológicas e pedológicas, isoietas, hietogramas, entre outros (Bitar, 2014).

Ainda segundo Bitar (2014) esses dados são cruzados e organizados para gerar mapas temáticos detalhados. O Datum utilizado pelo CPRM para os arquivos é o WGS 1984, com projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) - Universal Transversa de Mercator, adaptada para os fusos de cada município. A partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Superfície (MDS), são calculadas variáveis como declividade e relevo sombreado, que por sua vez embasam a análise de suscetibilidade e a identificação de áreas de suscetibilidade. Esses dados são utilizados para a construção destas cartas, que auxiliam na gestão e prevenção de desastres naturais, os quais serão descritas posteriormente.

Silva (2023) exemplifica a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento em casos de eventos extremos através da retroanálise realizada por sensoriamento dos danos causados pelo evento extremo de 2019 de precipitação e granizo nos mangues do município de Iguape/SP. O estudo baseou-se na série histórica de imagens do satélite *Sentinel-2* da área afetada. Foram definidas as seis subáreas mais danificadas, identificadas através de análise visual por meio da composição colorida (*RGB*), com resolução de 10 a 60 metros em diferentes bandas.

Silva (2023) utilizou o *software* SIG *Google Earth Engine* (GEE) como principal ferramenta de análise espacial e obtenção da base de dados. As áreas mais atingidas estão expostas nas Figuras 19 e 20, respectivamente antes e depois do evento, onde percebem-se os danos à vegetação local decorrente da grande perda de área foliar.

Figura 19 - Áreas de grande impacto antes o evento, 27/05/2019, Iguape/SP



Fonte: Silva (2023, p. 17).

Figura 20 - Áreas de grande impacto após o evento, 19/06/2019, Iguape/SP



Fonte: Silva (2023, p. 15).

Desta forma evidencia-se que o sensoriamento remoto e o geoprocessamento são ferramentas indispensáveis para a retroanálise de movimentos de massa decorrentes de eventos extremos. Estas tecnologias permitem a identificação de áreas suscetíveis, dando suporte a tomadas de decisão em prol da redução de vulnerabilidades e da gestão de riscos.

2.4 Mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa

Neste tópico, será explicado o processo de mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa, com foco na elaboração e importância das cartas de suscetibilidade e dos mapas de uso e ocupação do solo. Serão discutidos os métodos e dados utilizados para identificar regiões de risco e como esses instrumentos são fundamentais para o planejamento urbano e a mitigação de desastres naturais.

2.4.1 Cartas de suscetibilidade

Conforme descrito por Bitar (2014), a PNPDEC contempla a realização do mapeamento para prevenção de desastres naturais, como deslizamentos, corridas de massa, inundações e enxurradas, para municípios vulneráveis. Estas são ações preventivas integradas a políticas setoriais como ordenamento territorial, planejamento urbano e proteção ambiental que visam promover o desenvolvimento sustentável no Brasil.

A Lei Federal n.º 12.608 (Brasil, 2012) estabelece a obrigatoriedade de criação de um cadastro nacional que mapeie municípios com áreas vulneráveis a deslizamentos de grande magnitude, inundações repentinas e outros processos relacionados de origem geológica ou hidrológica. Carvalho, Macedo e Ogura (2007) abordam termos e conceitos acerca dos riscos geotécnicos que são comumente utilizados na elaboração deste tipo de mapeamento, listados a seguir:

- b) perigo (hazard): condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável;
- c) vulnerabilidade: grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo;
- d) suscetibilidade: indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade e ocorrência;
- e) risco: relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco; (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007, p. 25-26)

Segundo Carvalho, Macedo e Ogura (2007), o mapa de risco elaborado pelo IPT utiliza como base dois mapeamentos previamente desenvolvidos: o mapa de inventário e o mapa de suscetibilidade. O mapa de inventário reúne informações como

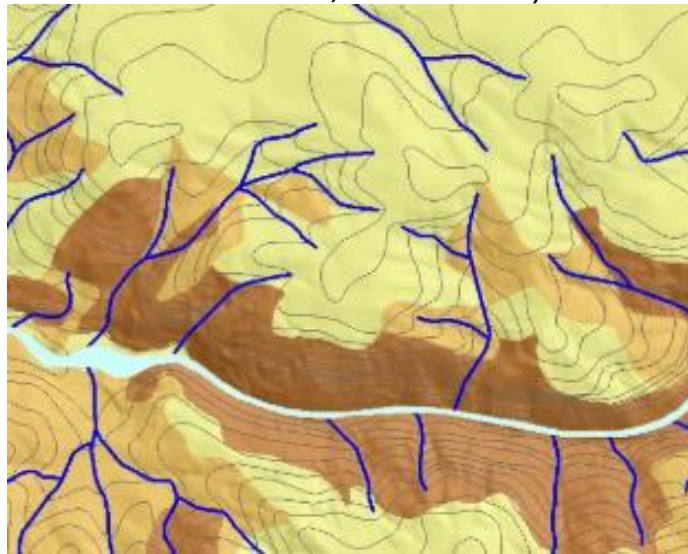
localização dos eventos ocorridos, tipo de movimento, volume, extensão do deslocamento, estado de atividade, data do ocorrido e dados coletados em campo. O mapa de suscetibilidade é desenvolvido para identificar a probabilidade de ocorrência de eventos, estabelecendo correlações entre fatores e incidentes, além de classificar a área por classes de suscetibilidade e regiões de suscetibilidade a eventos específicos, como corrida de massa, escorregamentos/solapamentos de talude e inundações. Por fim, a combinação dos mapas de inventário e suscetibilidade permite a criação do mapa de risco, que avalia a probabilidade de ocorrência de fenômenos geológicos e os potenciais impactos sociais e econômicos associados (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007).

A respeito das cartas de suscetibilidades, Bitar (2014) salienta que a avaliação da suscetibilidade de uma área norteia restrições à ocupação do solo, prevenindo a criação de novas zonas de risco, assim como promove o desenvolvimento de normas e práticas que garantam o uso adequado do solo, tanto em áreas não ocupadas quanto nas já urbanizadas, buscando reduzir os riscos nessas regiões. Ou seja, a elaboração de cartas de suscetibilidade, juntamente com os mapas de inventário e de risco, subsidia a formulação e implantação de políticas públicas municipais, estaduais e federais voltadas à prevenção de desastres naturais (Bitar, 2014).

Bitar (2014) descreve que a elaboração das cartas de suscetibilidade é baseada em um processo metodológico que envolve a coleta e análise de diferentes tipos de dados históricos e de levantamentos in loco. A principal ferramenta para o desenvolvimento dessas cartas é o uso de SIG, que integra dados topográficos, geológicos, hidrológicos e meteorológicos. Esses dados são analisados para identificar as áreas mais suscetíveis a eventos geológicos ou hidrológicos, considerando não apenas as características naturais do terreno, mas também os eventos passados, como deslizamentos e inundações ocorridos na região. A inclinação do terreno, a geologia local, os tipos de solo, a densidade da vegetação e o regime de precipitação são essenciais para a elaboração das cartas de suscetibilidade. As cicatrizes de movimentos pretéritos são determinadas em polígonos em *software* SIG por meio de interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução (Bitar, 2014).

As cicatrizes identificadas são utilizadas para gerar uma estimativa da probabilidade de ocorrência de desastres, que são então divididos entre as classes de suscetibilidade baixa, média e alta. Conforme Rocha *et al.* (2021) e Bitar (2014), para definição das classes de suscetibilidade, é aplicado o conceito de Unidade Homogênea de Terreno (UHT), que consiste em delimitar polígonos de unidades relativamente homogêneas de terreno com relação a aspectos geomorfológicos, hidrológicos e geológicos. Assim, a alta de suscetibilidade contempla as áreas de UHTs com 90% dos deslizamentos pretéritos mapeados, enquanto as áreas de classe média serão as UHTs que contemplam os demais 10% dos deslizamentos mapeados, totalizando 100% da área das cicatrizes pretéritas. Por sua vez, a baixa suscetibilidade representa as demais áreas cuja ocorrência de deslizamentos foi desprezível. Dessa forma, compõe-se o zoneamento da suscetibilidade em três classes, conforme Figura 21 a seguir (Bitar, 2014).

Figura 21 - Zoneamento das classes de suscetibilidade (laranja escuro: alta; laranja claro: intermediária; amarelo: baixa)



Fonte: Bitar (2014, p. 17).

Embora as cartas de suscetibilidade sejam essenciais para a prevenção de desastres naturais, elas apresentam limitações devido à incerteza na previsão de eventos extremos e à necessidade de dados atualizados para refletir as condições atuais da área. Decorre disto a importância da realização de retroanálises das cartas de suscetibilidade com novos mapas de uso e ocupação do solo elaborados após a ocorrência de novos acidentes, como, por exemplo, o ocorrido no RS em 2024. A

realização de retroanálises permite aproximar as previsões existentes nas cartas de suscetibilidade ao cenário real após os acidentes (Bitar, 2014).

Bitar (2014) aponta ainda que o processo de elaboração de cartas de suscetibilidade compreende tanto a etapa de mapeamento através de geoprocessamento, como a etapa de posteriores levantamentos de campo. A precisão deste trabalho de mapeamento é maior quanto maior for o número de retroanálises de eventos ocorridos no território nacional incorporadas à mesma. Estas são complementados, também, por levantamentos de campo mais detalhados das áreas atingidas.

Retroanálises, portanto, elevam a acurácia das cartas de suscetibilidade e são possíveis através do método investigativo de fotointerpretação de feições associadas a processos, o que permite a validação dos zoneamentos preliminares (Bitar, 2014). A Figura 22 a seguir exemplifica a identificação de cicatrizes de deslizamentos recentes que contribuíram para a retroanálise que embasou a elaboração da carta de suscetibilidade de Ilhota/SC.

Figura 22 - Cicatrizes de deslizamentos, Ilhota/SC



Fonte: Bitar (2014, p. 28).

Samia *et al.* (2016) contribuem com o conceito de "*path dependency*" (dependência de caminho), que indica que escorregamentos recentes podem ser influenciados por ocorrências anteriores. Ou seja, há maior probabilidade de ocorrer movimentos de massa próximos a locais de acidentes pretéritos, o que corrobora para a importância da realização de estudos de retroanálise e da criação de inventários de escorregamentos.

2.4.2 Mapas de uso e ocupação do solo

Segundo Santos e Petronzio (2011), a elaboração de mapas de uso e ocupação do solo a partir de interpretação de imagens de satélites possibilitam caracterizar áreas de estudo de acordo com o enfoque necessário à cada investigação. A seleção da imagem e o método de classificação do uso do solo devem ser definidos considerando as particularidades da área de estudo e as demandas específicas do estudo (Silva; Brito; Rosa, 2005). Além de identificar as áreas ocupadas por vegetações nativas, cursos de rios, agricultura ou edificações, os mapas de uso e ocupação do solo também são capazes de localizar áreas de risco, áreas intensamente degradadas por determinado evento, assim como distinguir variações decorrentes da evolução da paisagem, sejam elas naturais ou de causa antrópica (Santos; Petronzio, 2011).

Vaeza *et al.* (2010) reforçam que identificar e classificar o uso do solo é fundamental para o conhecimento do ambiente, o que embasa o planejamento urbano seguro e sustentável. É importante destacar que o conhecimento acerca das formas de ocupação do espaço requer informações detalhadas que devem ser atualizadas com grande periodicidade, visto o caráter de dinamismo da utilização do meio ambiente (Foresti; Hamburguer, 1995 *apud* Bittencourt; Batista; Catelani, 2006).

Mapas de uso e ocupação do solo são capazes de evidenciar áreas de ocupação humana e cruzá-las com as áreas de alta classe de suscetibilidade a movimentos de massa contidas em cartas de suscetibilidade. A partir deste cruzamento, a identificação das áreas de risco se faz possível. Ou seja, para se obter a relação entre a possibilidade de ocorrência de um fenômeno e a magnitude das consequências que este pode causar, dados contidos nos mapas de uso e ocupação do solo são essenciais (Carvalho; Macedo; Ogura, 2007).

3 MÉTODO DE PESQUISA

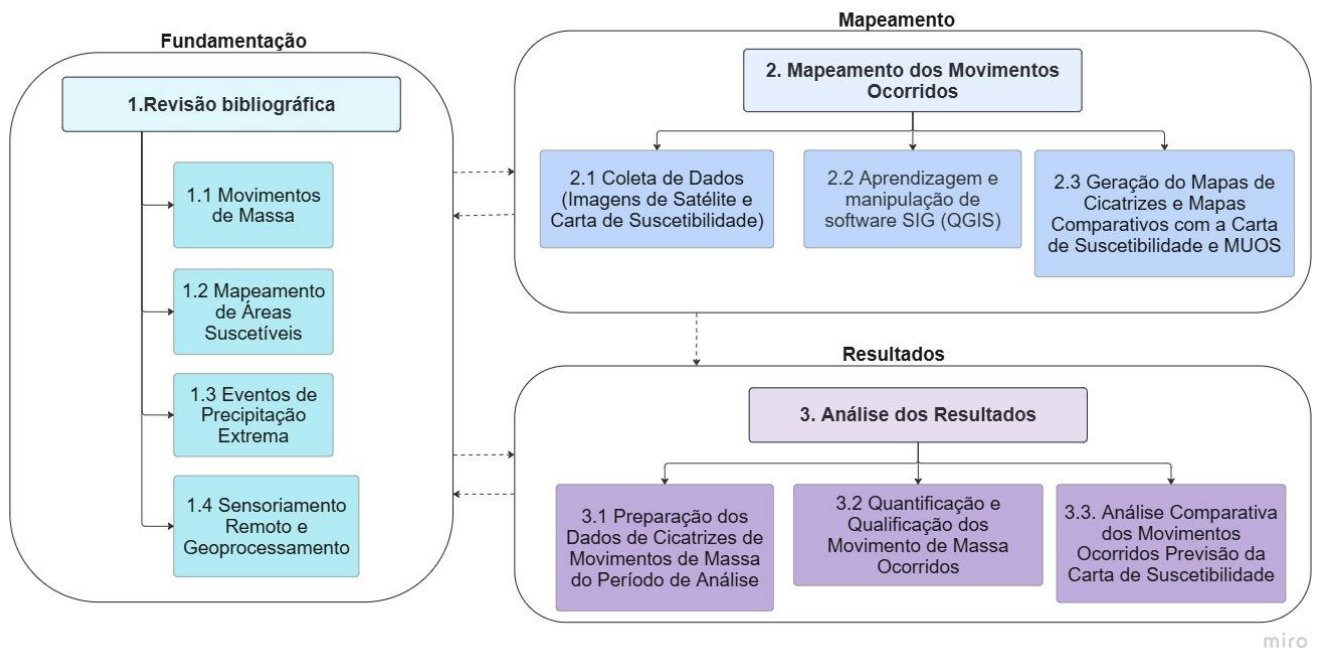
O método deste trabalho baseou-se na utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para identificar os movimentos de massa ocorridos em Caxias do Sul/RS (cujas particularidades estão apresentadas a seguir), entre abril e maio de 2024, e permitir a comparação com a previsão de suscetibilidade existente na carta de suscetibilidade do município. Isto define a pesquisa a ser desenvolvida como sendo de caráter descritivo, experimental, ext-post-facto e de estudo de caso. Conforme Gil (2010), a pesquisa descritiva busca caracterizar fenômenos ou populações, enquanto a pesquisa experimental seleciona variáveis de estudo e verifica relações causais entre elas. Já a pesquisa ex-post-facto dá-se a partir de eventos passados e faz uma análise detalhada de um fenômeno dentro do seu contexto específico (GIL, 2020).

A partir do cruzamento de dados advindos da carta do município - declividade, altitude, geologia, pedologia, classes de suscetibilidade, regiões de suscetibilidade específica - com dados de uso e ocupação do solo e dados das cicatrizes dos movimentos de massa observadas em imagens de satélite das áreas atingidas pelos eventos de 2024, foi realizada uma análise mista, buscando classificar tais movimentos a partir destes dados, observando-se a distribuição espacial destas ocorrências nas classes de uso do solo e nas zonas de suscetibilidade elaborada pelo CPRM-Serviço Geológico do Brasil (2017), o que embasou a retroanálise da acurácia deste zoneamento previamente realizado.

3.1 Fluxograma

Deste modo, apresenta-se na Figura 23 a seguir um fluxograma com as etapas desta pesquisa, que estão divididas em 3 grandes grupos – Fundamentação, Mapeamento e Resultados.

Figura 23 - Fluxograma: Etapas do trabalho



Fonte: Elaboração própria (2025).

As etapas da pesquisa incluem a coleta dos dados de entrada, o mapeamento das cicatrizes identificadas, a produção dos mapas que relacionam as cicatrizes identificadas com a carta de suscetibilidade do município e com o mapa de uso e ocupação do solo e a posterior análise dos dados. Como dados de entrada, foram utilizadas imagens do satélite *Sentinel-2* de 21 de abril de 2024 (antes do evento) e de 06 de maio de 2024 (após o evento) com resolução de 10 m, bandas B2, B3 e B4 e o Mapa de Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas (2024). Os dados vetoriais e matriciais contidos nos *shapefiles* da Carta de Suscetibilidade do Município de Caxias do Sul/RS compuseram a segunda parcela dos dados de entrada deste estudo. Estes dados foram sobrepostos e processados através do *software* SIG para a elaboração dos mapas que embasaram a retroanálise dos movimentos de massa ocorridos e a avaliação da acurácia do estudo preditivo de suscetibilidade da carta do município. O Mapa Geológico do município também foi utilizado para contribuir na análise das áreas urbanas atingidas. A seguir, o Quadro 1 traz um resumo dos dados de entrada que foram utilizados na elaboração desta pesquisa.

Quadro 1 - Dados de Entrada

Dados	Resolução/ Escala	Fonte	Data
Imagem <i>Sentinel-2</i> antes do evento	10 m	<i>Copernicus</i> (EUROPEAN SPACE AGENCY)	21/04/2024
Imagem <i>Sentinel-2</i> depois do evento	10 m	<i>Copernicus</i> (EUROPEAN SPACE AGENCY)	06/05/2024
Carta de Suscetibilidade de Caxias do Sul/RS (carta síntese e <i>shapefiles</i>)	1:120.000	CPRM-Serviço Geológico do Brasil	01/10/2017
Mapa Hipsométrico de Caxias do Sul/RS (<i>shapefile</i>)	1:120.000	CPRM-Serviço Geológico do Brasil	01/10/2017
Mapa de Declividade de Caxias do Sul/RS (<i>shapefile</i>)	1:120.000	CPRM-Serviço Geológico do Brasil	01/10/2017
Mapa de Relevo de Caxias do Sul/RS (<i>shapefile</i>)	1:120.000	CPRM-Serviço Geológico do Brasil	01/10/2017
Mapa de Uso e Cobertura da Terra (<i>shapefile</i>)	1:100.000	MapBiomás	01/06/2024
Mapa de Precipitações Médias de Caxias do Sul/RS (<i>shapefile</i>)	1:5.000.000	CPRM-Serviço Geológico do Brasil	11/2011
Mapa Geológico de Caxias do Sul	1:35.000	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental	2015

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para realizar o geoprocessamento proposto, foi utilizado o *software* livre e gratuito Quantum Gis (QGIS), versão 3.30 LTR (*Long Term Release*). Segundo Tomazoni e Guimarães (2024), o QGIS é um *software* SIG criado pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), e trata-se um sistema de informação geográfica (SIG) de código aberto e de fácil utilização. Os autores acrescentam que o QGIS permite a visualização, a criação, a edição e a análise de grande volume de dados, além da elaboração de mapas para impressão, tornando-se uma ferramenta essencial para aplicações em geoprocessamento. Além disso, foi usado também o *plug-in Sen2Cor* para QGIS para a realização de correções atmosféricas nas imagens de satélite.

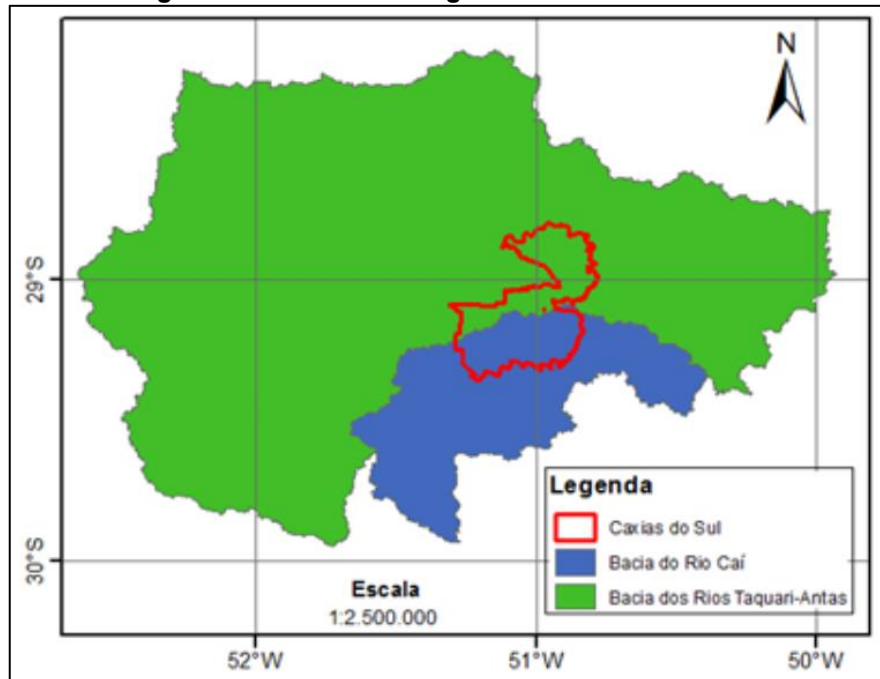
3.2 Área de estudo: Caxias do Sul/RS

Conforme exposto anteriormente, no ano de 2024 o Estado do Rio Grande do Sul sofreu com um evento de precipitação extremo de grandes proporções, o qual atingiu cerca de 96 % dos municípios. Neste contexto, Caxias do Sul/RS foi apontada em nota técnica conjunta realizada pelo IGEO e CEP SRM da UFRGS como o município que registrou maior quantidade de cicatrizes de movimentos de massa

decorrentes do evento de precipitação extrema de 2024 (IGEO/CEPSRM, 2024). Este foi o dado que norteou a escolha da área de estudo, descrita a seguir.

Situado na região nordeste do RS, o município de Caxias do Sul ocupa uma área de 1.652,32 km² e possui uma população estimada de 479.256 habitantes (IBGE, 2022). Segundo a Prefeitura de Caxias do Sul (2022), a cidade localiza-se entre as bacias hidrográficas dos rios Caí e Taquari/Antas (Figura 24) e possui variadas classes de solos, com altitudes mínimas médias de 183m e altitudes máximas médias de 882m. Esta diferença de altitude caracteriza a região como montanhosa, o que é fator desencadeador de movimentos de massa quando combinado com eventos extremos de precipitação.

Figura 24 - Bacias Hidrográficas de Caxias do Sul

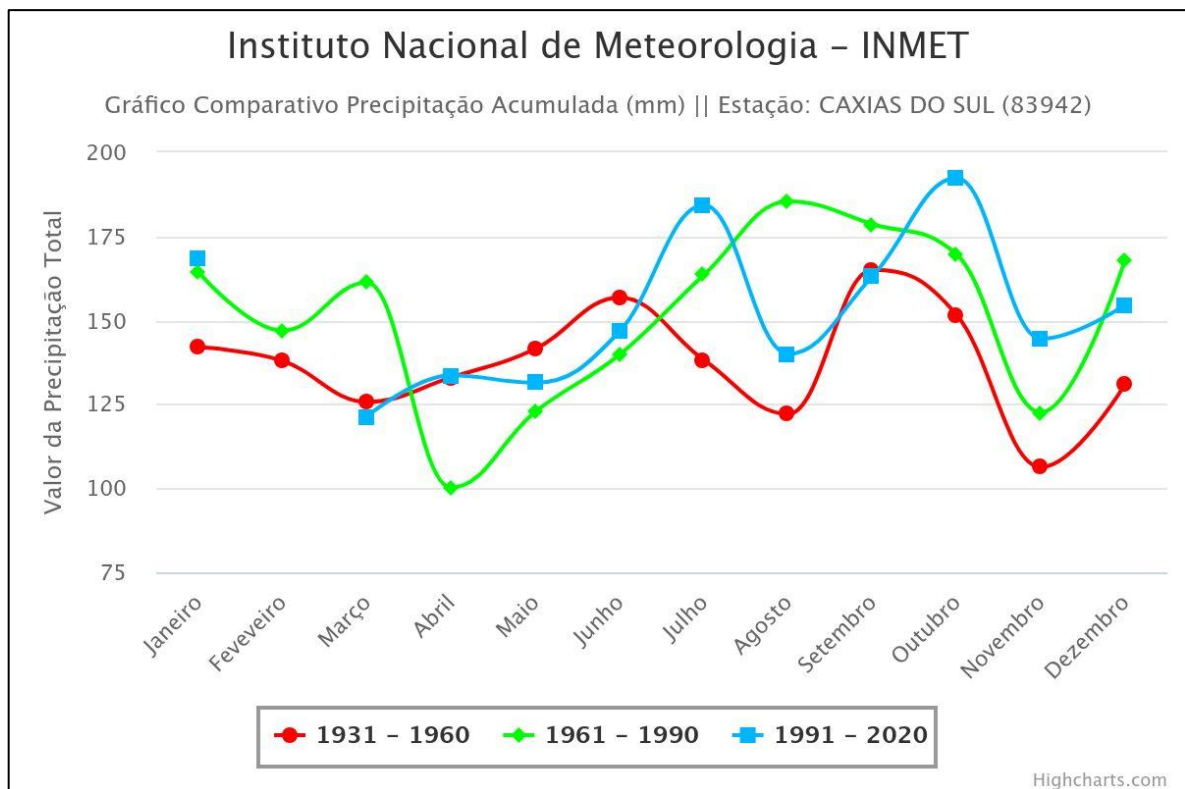


Fonte: SAMAE (2025, *on-line*).

De acordo com Borsatto *et al.* (2015), a rápida expansão demográfica de Caxias do Sul ocorreu sem um planejamento urbano adequado, o que levou parte da população de baixa renda a ocupar áreas suscetíveis a riscos naturais. Entre essas áreas estão margens de cursos d'água, planícies de inundação e encostas de morros, onde processos de dinâmica superficial são comumente desencadeados (Borsatto *et al.*, 2015).

Segundo Kuintcher e Buriol (2001 *apud* Pereira, 2015, p. 20), o clima de Caxias do Sul é temperado (Cfb), de acordo com a classificação climática de Köppen, sendo caracterizado por verões amenos e invernos relativamente frios. A precipitação média anual é de 1.823 mm, distribuída de forma uniforme ao longo do ano, conforme as normais climatológicas do INMET (2022). A média de precipitação mensal do município foi apontada pela Secretaria da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural do RS (2020) no Atlas Climatológico do RS, que baseia-se em meteorológicos do INMET e da ANA, como 144.95 mm. Vergani (2021) acrescenta ainda que, em Caxias do Sul/RS, geadas são fenômenos comuns durante o inverno, além da possibilidade de eventos extremos, como longos períodos de estiagem e episódios de granizo. O Gráfico 5 a seguir traz o comparativo de precipitação acumulada (mm) por mês das normais climatológicas de 1931-1960, 1961-1990 e 1991-2020 da estação de Caxias do Sul, gerado pelo INMET.

Gráfico 5 – Precipitação mensal acumulada (mm) das Normais Climatológicas de Caxias do Sul/RS

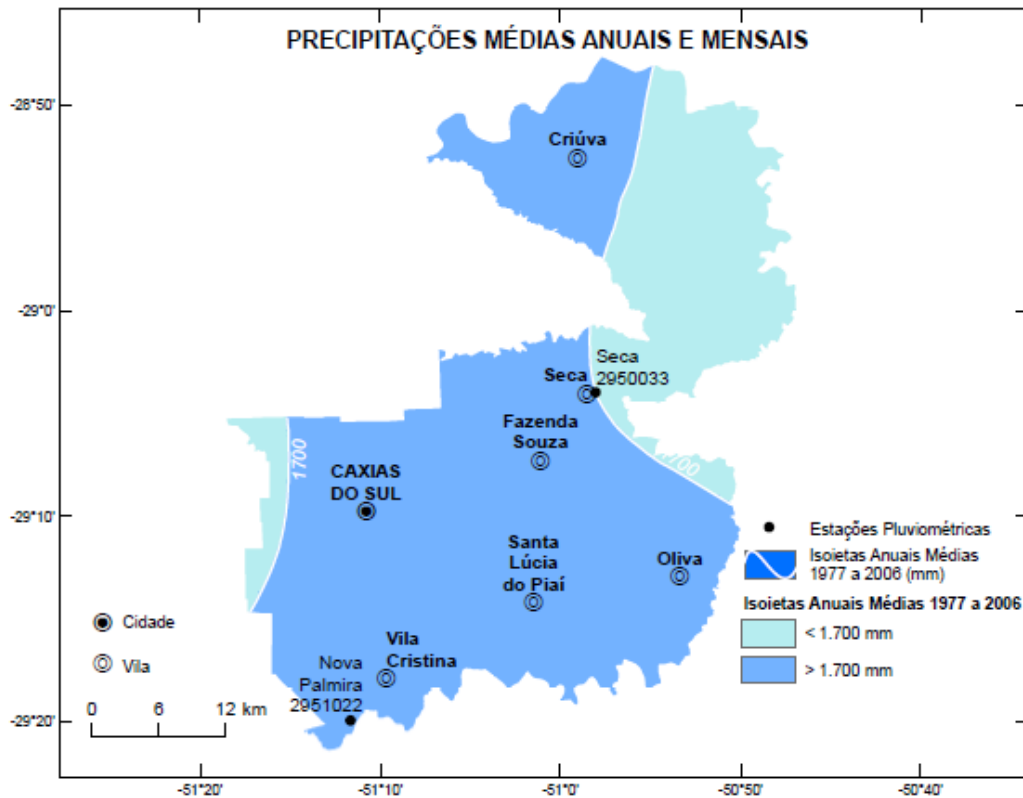


Fonte: INMET (2025, *on-line*).

A carta de suscetibilidade de Caxias do Sul/RS inclui o mapa de precipitações médias anuais e mensais do município com hietogramas, que estão

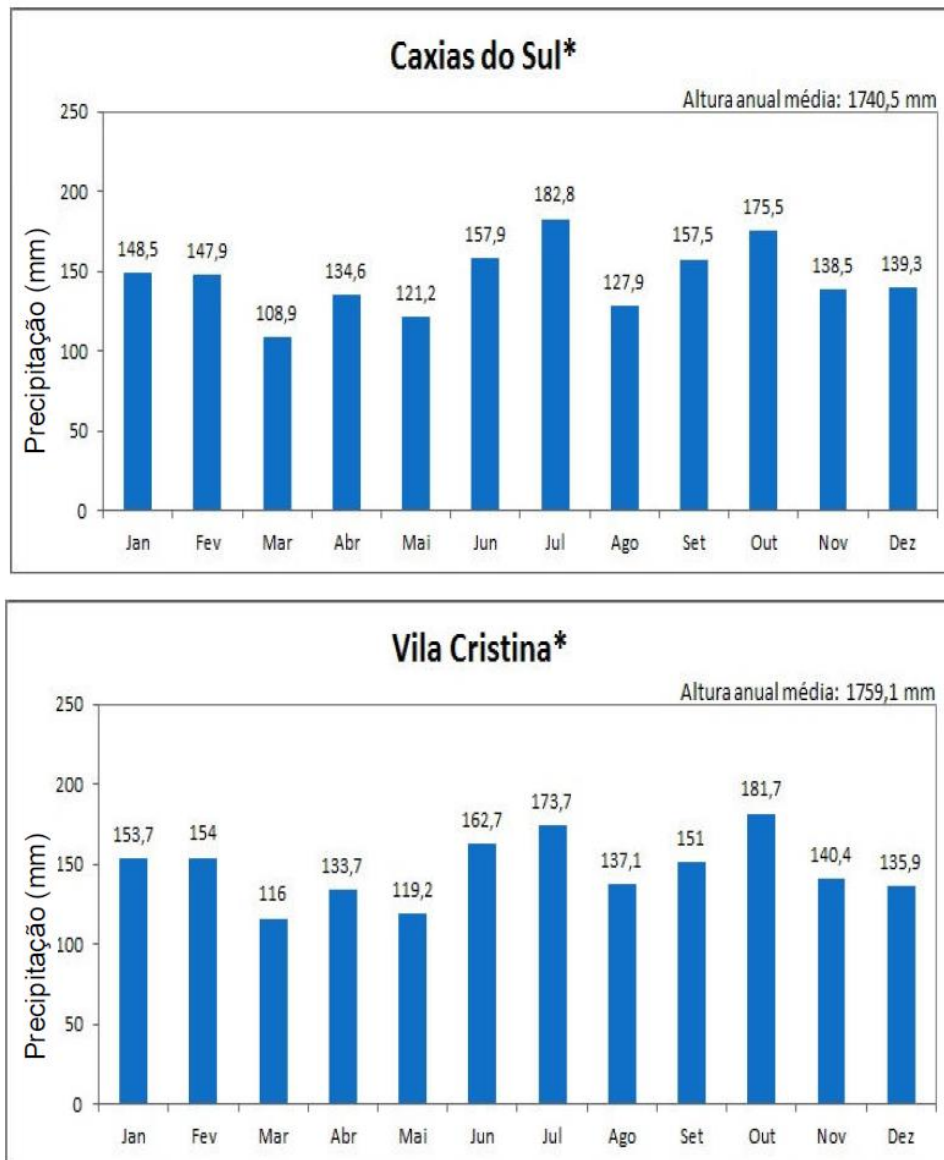
dispostos nas Figuras 25 e 26 a seguir. Este foi elaborado com base em Pinto *et al.* (2013) e divide a região entre os locais que possuem valores de isoietas anuais médias entre os anos de 1977 e 2006 abaixo de 1.700 mm (azul claro) e aquelas que apresentam valores de isoietas mensais médias acima de 1.700 mm (azul escuro), assim como define o local das estações pluviométricas. Estão representados graficamente nos hietogramas de Caxias do Sul e região metropolitana (destacados Caxias do Sul e Vila Cristina) os valores de precipitação (mm) mensais e médias anuais por município (Pinto *et al.*, 2013).

Figura 25 - Mapa de precipitações médias anuais e mensais



Fonte: Adaptado de CPRM (2017, p. 1).

Figura 26 - Hietogramas - Médias mensais



Fonte: Adaptado de CPRM (2017, p. 1).

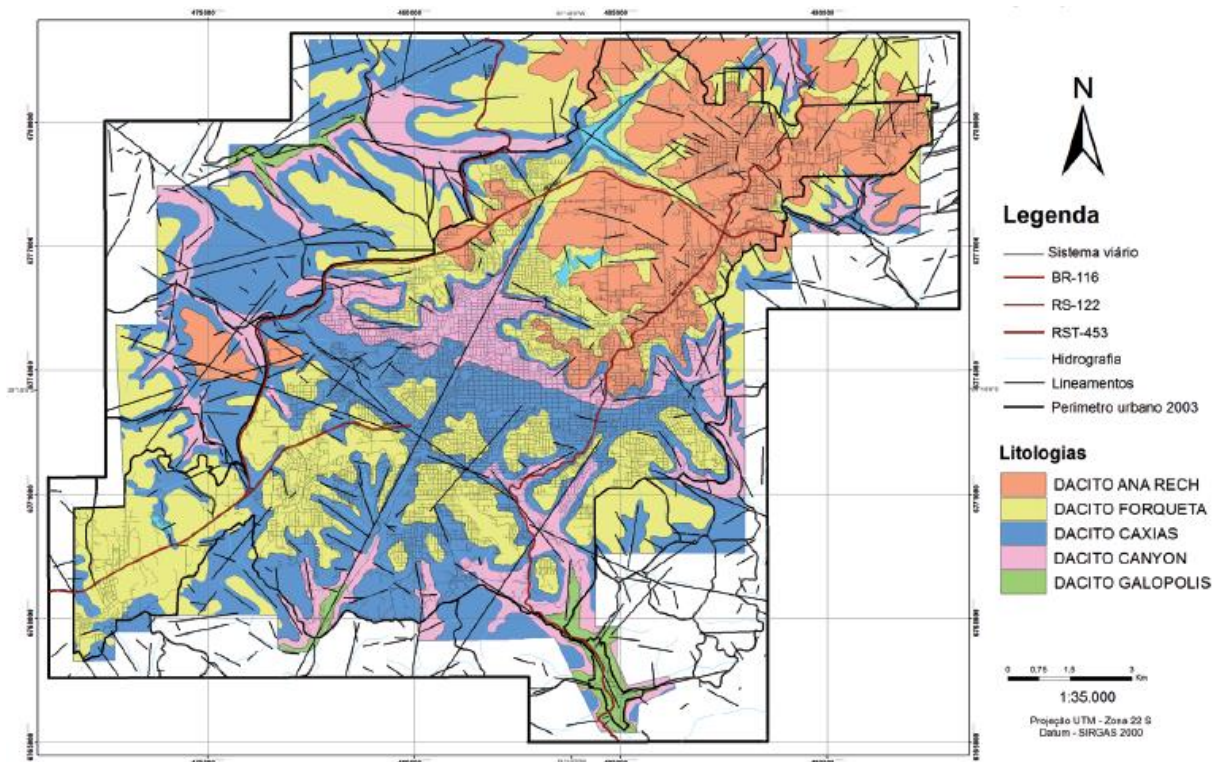
3.2.1 Formação geológica da área de estudos

Segundo o mapa de Regiões Geomorfológicas do estado do RS (Radambrasil, 1986 *apud* Borsatto *et al.* 2015, p. 85), Caxias do Sul/RS localiza-se na região geomorfológica conhecida como Planalto das Araucárias. De acordo com Borsatto *et al.* (2015), essa região apresenta características geomorfológicas diversas, com relevo que varia entre superfícies amplas e planas e áreas mais profundamente entalhadas, como ocorre nos Aparados da Serra. A região é composta por quatro

unidades geomorfológicas distintas: o Planalto Dissecado Rio Iguaçu-Rio Uruguai, a Serra Geral, os Patamares da Serra Geral e o Planalto dos Campos Gerais. Segundo Borsatto *et al.* (2015), a Formação Serra Geral cobre cerca de 1.700.000 km² no centro-sul do Brasil, abrangendo 75% dos sedimentos da Bacia do Paraná, ampla bacia intracratônica formada sobre a crosta continental, composta por depósitos de rochas sedimentares e vulcânicas.

Borsatto *et al.* (2015) aponta que, além dos afloramentos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, Caxias do Sul apresenta também depósitos recentes de tálus e colúvios. As litologias predominantes foram caracterizadas por Bressani, Flores e Nunes (2005) como uma sequência vulcânica composta por diferentes tipos de dacitos. Entre eles, os Dacitos Galópolis aparecem como uma unidade única devido à semelhança nos solos plásticos que derivam desses derrames, ou seja, estes deformam-se facilmente quando em contato com a água. Os Dacitos Canyon, altamente alteráveis, predominam em áreas como o bairro Canyon e vales ao sul da cidade, favorecendo o desenvolvimento de solos espessos. Já os Dacitos Caxias, conhecidos também como Dacito Carijó, cobrem a região central e grande parte ao sul, caracterizando-se por sua ampla distribuição. O Topo do Dacito Caxias, com características vítreas marcantes, é associado ao Vitrófiro Forqueta, ocorrendo em áreas planas, como na região do aeroporto. Por fim, o Dacito Ana Rech predomina no norte da cidade, especialmente em cotas elevadas, chegando a 900 metro (Bressani; Flores; Nunes, 2005). A seguir, a Figura 27 representa o mapa geológico do município:

Figura 27 - Mapa geológico da área urbana de Caxias do Sul/RS



Fonte: Borsatto *et al.* (2015, p. 90).

3.2.2 Carta de suscetibilidade da área de estudo

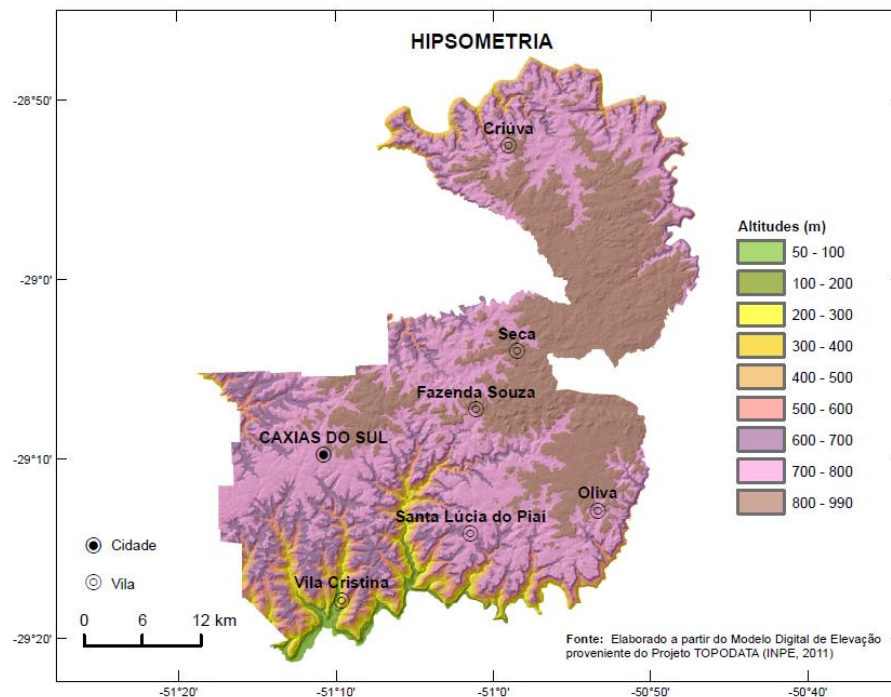
A Carta de Suscetibilidade de Caxias do Sul/RS foi produzida pelo CPRM (2017), e representa um importante instrumento para a gestão territorial e ambiental do município, que foi essencial para a elaboração desta pesquisa. A carta síntese, disponível no Anexo A, expõe os dados em um arquivo de extensão .PDF georreferenciado, cujas camadas podem ser isoladas e manipuladas em software SIG. Esta carta está representada em escala 1:120.000 e divide o mapa em diferentes cores que indicam as classes baixa, média e alta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, assim como cores que indicam as classes alta e média de suscetibilidade a inundações. Os quadros legendas trazem informações complementares relativas a cada classe: área, relevo, forma da encosta, declividades, tipos de solo, prováveis tipos de movimentos de massa ou processos de inundações, enchentes, solapamento de margem e assoreamento que poderiam ocorrer, entre outras. São também quantificadas as áreas de cada classe e os percentuais destas

classes de suscetibilidade com relação à área total do município. O Anexo B contém o Quadro Legenda-A – Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa, enquanto o Anexo C contém o Quadro Legenda-B – Suscetibilidade a Inundações.

Além disso, compõe este documento os arquivos vetoriais (*shapefiles* - extensão .SHP), que apresentam diversas informações como limites e feições da área de estudo, topografia, regiões de suscetibilidade específica – a corrida de massa, a solapamento/escorregamento e a inundações.

Tanto os arquivos vetoriais (*shapefiles*) quanto a carta síntese serão utilizados como dados de entrada nesta pesquisa, por fornecerem informações sobre a localização das classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) e das áreas com suscetibilidade específica a diferentes tipos de processos (corridas de massa, solapamentos/escorregamentos e inundações). Os dados referentes à altitude, declividade e relevo da área de estudo estão diretamente relacionados às classes de suscetibilidade, sendo fundamentais para subsidiar a análise apresentada nas etapas seguintes. Na carta síntese, essas variáveis estão representadas nos seguintes mapas temáticos: mapa hipsométrico (Figura 28), mapa de declividade (Figura 29) e mapa de relevo (Figura 30), apresentados a seguir.

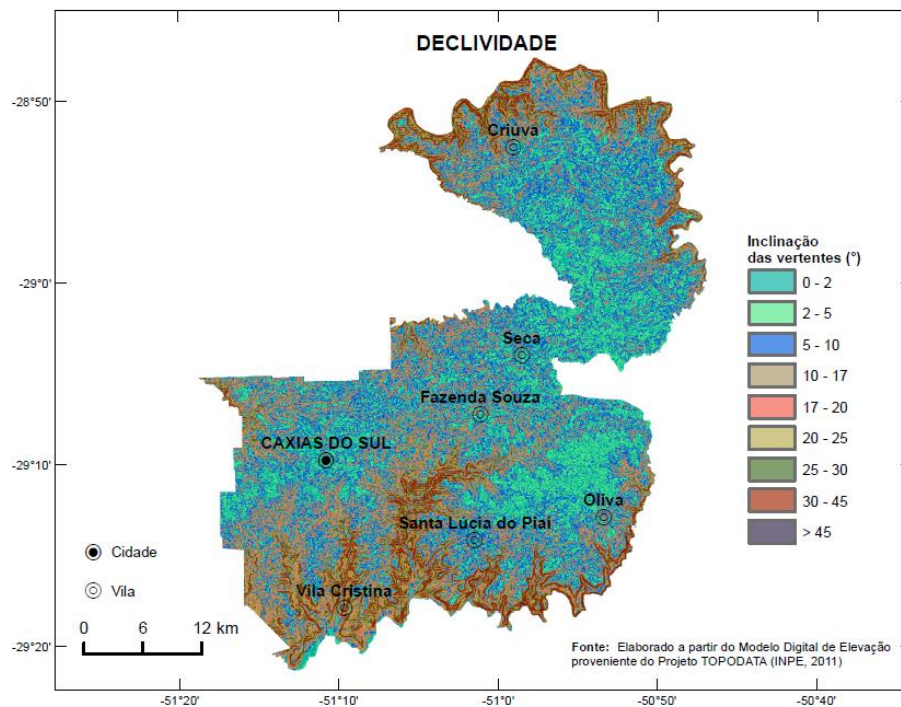
Figura 28 - Mapa hipsométrico de Caxias do Sul



Fonte: CPRM (2017, p. 1).

O mapa hipsométrico presente na Carta de Suscetibilidade de Caxias do Sul foi elaborado a partir do MDE proveniente do Projeto TOPODATA (INPE, 2011 *apud* CPRM, 2017, p. 1). Segundo Soares e Piroli (2019), a hipsometria refere-se a um atributo geomorfológico que possibilita a análise da variação de altitudes em uma determinada região, sendo obtida por meio de MDE. Nesse contexto, a carta hipsométrica é um recurso essencial, que apresenta informações sobre a altimetria de uma área específica, permitindo ao usuário identificar a variação de cotas mínimas e máximas do terreno. Dessa forma, é possível compreender melhor a configuração altimétrica da região em estudo (Soares; Piroli, 2019).

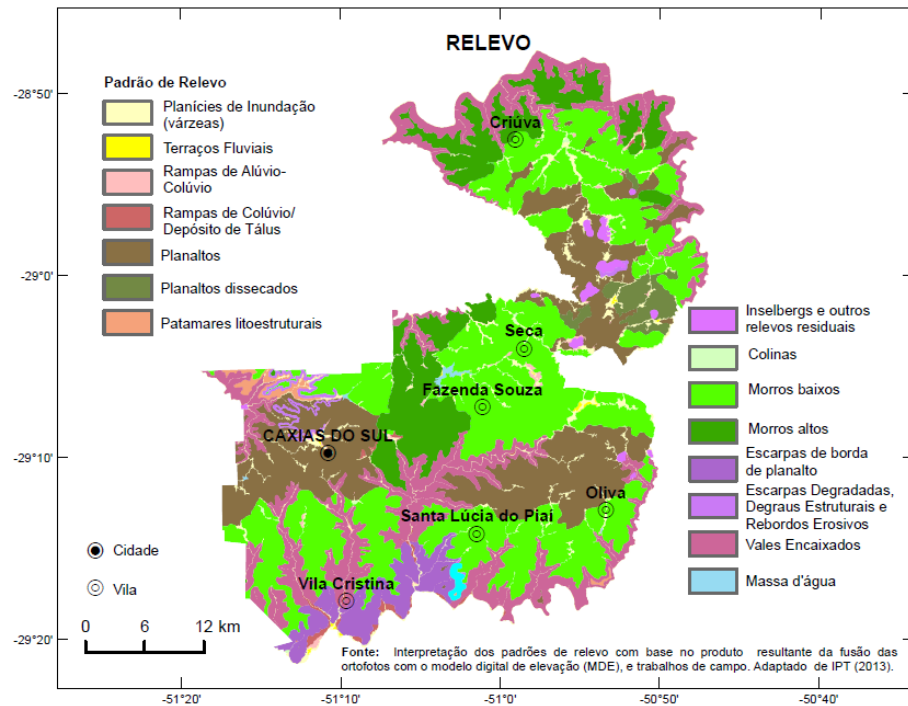
Figura 29 - Mapa de declividade de Caxias do Sul



Fonte: CPRM (2017, p. 1).

O mapa de declividade contido na carta também se baseou no MDE proveniente do Projeto TOPODATA (INPE, 2011 *apud* CPRM, 2017, p. 1). Segundo Ramalho Filho e Beek (1995), os mapas de declividade, criados a partir de MDE, são instrumentos fundamentais na análise geomorfológica, pois mostram as inclinações em graus do terreno em relação a um eixo horizontal. Os autores apontam ainda que esse tipo de mapa é importante para entender as características do terreno e planejar seu uso adequado. Leal, Aquino e Silva (2019), corroboram ao salientar que a análise de declividade é crucial para o ordenamento territorial e o planejamento urbano, pois permite identificar áreas mais propensas à erosão e aquelas mais adequadas para a agricultura ou urbanização.

Figura 30 - Mapa de relevo de Caxias do Sul



Fonte: CPRM (2017, p. 1).

O mapa de relevo traz informações sobre os diferentes padrões encontrados na região de Caxias do Sul, com destaque para a ocorrência de morros baixos, morros altos, planaltos, planaltos dissecados e morros baixos. A interpretação dos padrões de relevo foi realizada com base no produto resultante da fusão das ortofotos com o MDE, e trabalhos de campo e foi adaptado de IPT (2013 *apud* CPRM, 2017, p. 1).

3.3 Mapeamento das Cicatrizes e Análise de Uso e Ocupação do Solo

Os *softwares* de SIG podem ser empregados como ferramentas para a elaboração de mapas, para o suporte na análise espacial de fenômenos ou ainda como bancos de dados georreferenciados, com capacidades de armazenamento e recuperação de informações espaciais (Câmara; Medeiros, 1998). No que tange a análise da alteração da paisagem natural após a ocorrência de desastres ambientais, Namikawa *et al.* (2024) ao apontar que o mapeamento e a identificação de cicatrizes ou áreas afetadas por movimentos de massa podem fornecer informações sobre a

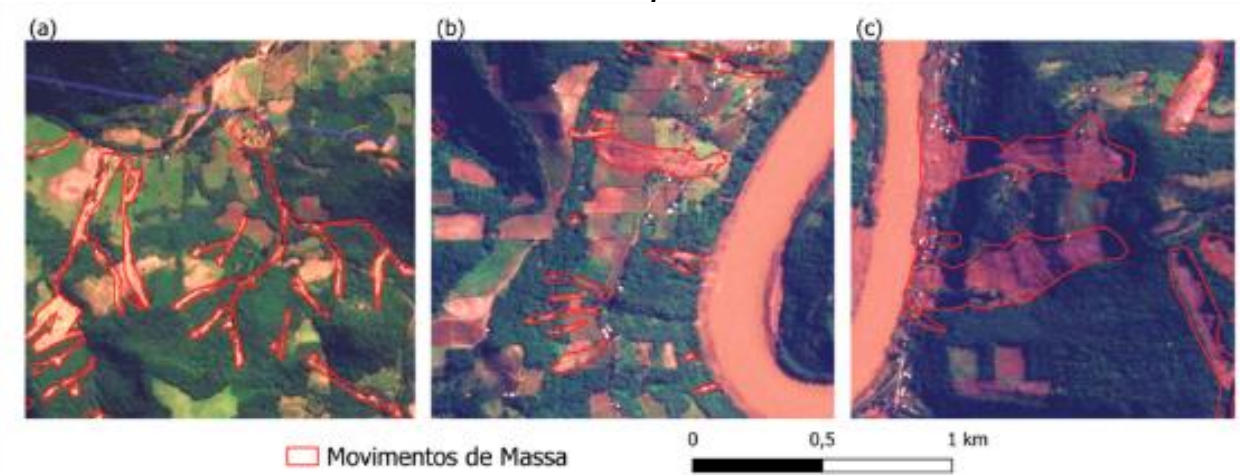
magnitude do desastre, tanto em termos de impactos socioeconômicos quanto dos processos responsáveis por alterar a paisagem.

A presente pesquisa propôs-se a elaborar o Mapa de Cicatrizes de Movimentos de Massa de Caxias do Sul/RS após a ocorrência do evento extremo de precipitação de maio de 2024 no RS, assim como os mapas temáticos comparativos das regiões atingidas com a previsão contida em carta de suscetibilidade do município e com o MUOS do MapBiomas recortado para a área de estudo. O objetivo foi mapear os movimentos gravitacionais de massa através de interpretação visual das imagens do sensor ótico do satélite *Sentinel-2*, resolução de 10 m em cores naturais, bandas B4, B3 e B2, do dia 06 de maio de 2024 (após a ocorrência do evento) em comparação às imagens do dia 21 de abril de 2024 (antes do evento) e realizar o processamento e definição das cicatrizes de movimentos de massa através do *software* SIG QGIS, versão 3.30 LTR. As regiões identificadas foram cruzadas com os diferentes *layers*/atributos contidos na carta de suscetibilidade do município e com o mapa de uso e ocupação do solo do MapBiomas, possibilitando a realização da retroanálise comparada à previsão em carta. Segundo Tomazoni e Guimarães (2024), a versão LTR do QGIS 3.30 possui garantia de estabilidade devido ao suporte prolongado dos desenvolvedores com foco em correções de bugs, ampla testagem e compatibilidade ideal para projetos de longo prazo.

Namikawa *et al.* (2024) realizaram o mapeamento das feições de inundações e movimento de massa decorrentes do mesmo evento de precipitação extrema de 2024 no RS. Estes autores analisaram a dinâmica multitemporal (antes e depois do evento) na totalidade do estado e detectaram mudanças a partir de interpretação visual de imagens de satélite. A elaboração dos mapas das áreas atingidas envolveu a integração de dados de diversas fontes, como a Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado, que forneceu a mancha da Área Diretamente Atingida (ADA) a partir do processamento digital de imagens da constelação *PlanetScope* (imagens de alta resolução privadas), com resolução de 3 metros, capturadas entre 5 e 15 de maio. A UFRGS complementou este estudo com dados do satélite *Sentinel-2* (imagens gratuitas), do Programa *Copernicus*, com resolução de 10 metros, capturados em 6 de maio, focando na bacia do Taquari-Antas. A validação final da ADA foi feita por interpretação visual das imagens *Planet* e *Sentinel-2*. As áreas de ruptura, transporte e deposição associadas aos movimentos

gravitacionais de massa foram mapeadas no *software* SIG QGIS (gratuito, versão não informada), com base em elementos de interpretação, como cor, forma e padrões das feições visíveis nas imagens (Namikawa *et al.*, 2024). Na Figura 31 a seguir, são expostos alguns exemplos dos polígonos de cicatrizes de movimentos de massa mapeadas no estudo citado, sendo estes: (a) Ocorrência de deslizamentos múltiplos que evoluíram para fluxos de detritos a jusante; (b) Deslizamentos planares com variadas magnitudes; (c) Deslizamentos planares de grande magnitude com deposição de material próxima à calha do rio.

Figura 31 - Feições associadas a movimentos de massa identificadas em imagens do satélite PlanetScope



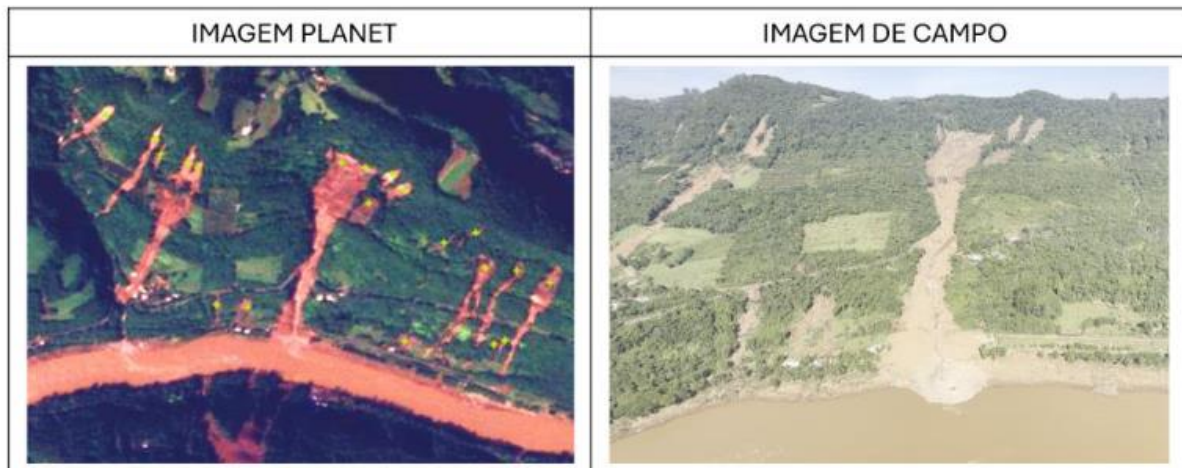
Fonte: Namikawa *et al.* (2024, p. 34).

Os autores Silva de Paula *et al.* (2024), que elaboraram o Mapeamento Preliminar dos Movimentos de Massa no Estado do RS utilizado de apoio ao corpo de bombeiros durante o desastre de maio de 2024, também fizeram uso de imagens do satélite *Sentinel-2*, resolução de 10m, e PlanetScope, resolução de 3,125m, para a realização do referido estudo. A identificação das cicatrizes foi feita pelos autores por meio de análise visual em escala 1:4.000, envolvendo a observação de padrões de mudanças no terreno e na vegetação, características indicativas de deslizamentos, nas imagens de satélite antes e depois do evento, e realizaram processamento mapeamento prévio em *software MyMaps* – Google, que possui funcionalidades SIG limitadas - não comportam grande quantidade de dados, MDEs ou análises topográficas, o que inviabiliza a escolha deste *software* no presente estudo.

Os resultados obtidos no mapeamento preliminar de Silva de Paula *et al.* (2024) identificaram cerca de 9 mil cicatrizes de deslizamentos e fluxos de detritos,

além de 705 edificações afetadas em mais de 150 municípios, com destaque para Fontoura Xavier, Veranópolis, Agudo, Bento Gonçalves, Caxias do Sul, entre outros. As cicatrizes correspondem, em sua maioria, a deslizamentos planares rasos de médio a grande porte, com áreas entre 500 e 1000 m². Silva de Paula *et al.* (2024) apontam que este é um estudo preliminar, e posterior delimitação dos polígonos das cicatrizes permitirão uma análise mais detalhada dos eventos ocorridos. Estes autores demonstram uma das cicatrizes encontradas em comparação à imagem fotográfica de campo do mesmo local na Figura 32 a seguir.

Figura 32 - Exemplo de cicatrizes identificadas em imagem de satélite *PlanetScope* e sua correspondente vista oblíqua em campo, Bento Gonçalves/RS



Fonte: Silva de Paula *et al.* (2024, p. 4).

Embora o satélite *PlanetScope* apresente maior precisão em suas imagens óticas, estas não estão disponíveis gratuitamente. Portanto, na presente pesquisa foram utilizadas as imagens do satélite *Sentinel-2*, disponíveis gratuitamente e com precisão suficiente para a identificação das cicatrizes de movimentos de massa.

Dias (2021) realizou uma pesquisa acerca das áreas suscetíveis a movimentos de massa no município de Presidente Getúlio/SC após evento de precipitação intensa em 2020. Este trabalho deu-se a partir da quantificação dos processos ocorridos no evento, relacionando o uso do solo mapeado por imagens do satélite *Sentinel-2* com a carta de suscetibilidade do município e a geomorfologia da região com utilização do *software* QGIS. Conforme Dias (2021), o processamento de imagens do satélite *Sentinel-2* no *software* QGIS deve seguir uma sequência de etapas de maneira a garantir a correta manipulação e análise dos dados espaciais para este fim. Este procedimento é essencial para a elaboração de mapas temáticos

antes e depois de eventos extremos, como o de 2024 em Caxias do Sul/RS. O presente trabalho baseou-se no método de Dias (2021) para a realização do processamento, detalhado a seguir, juntamente com contribuições de Silva e Lacerda (2020) e Pinto, Passos e Caneparo (2015) e adaptações adequadas ao estudo em questão.

- a) **Correção e Preparação das Imagens:** As imagens de satélite foram corrigidas radiométrica e atmosféricamente para assegurar que elas estejam prontas para análise sem distorções. Conforme descrito por Silva e Lacerda (2020), a correção de imagens *Sentinel-2* pôde ser feita em *software* SIG através do plug-in *Sen2Cor* (gratuito), desenvolvido pela *European Space Agency*. Dessa maneira, interferências atmosféricas são reduzidas, melhorando a qualidade dos dados para análises posteriores (Silva; Lacerda, 2020). A Figura 33 a seguir representa uma imagem do satélite *Sentinel-2* antes e depois da correção descrita.

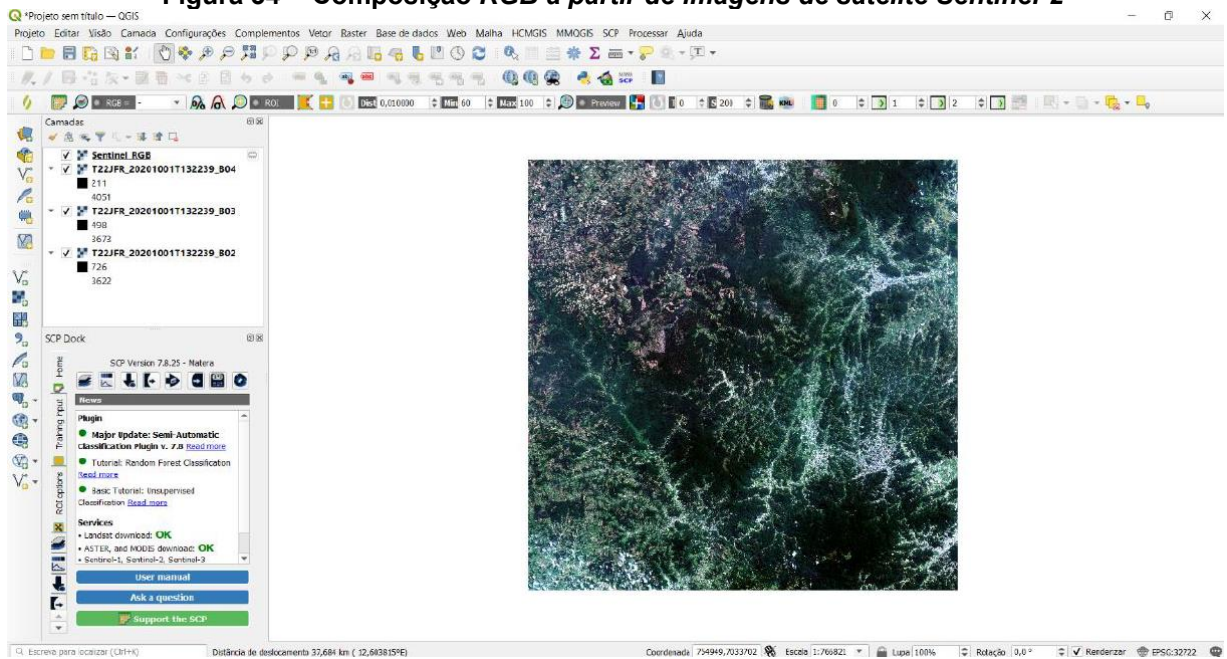
Figura 33 - Imagens do satélite *Sentinel-2* - original (à esquerda); após correção (à direita)



Fonte: Silva e Lacerda (2020, p. 4).

- b) **Montagem da composição RGB:** Dias (2021) indica a composição a partir de três bandas, sendo estas: Banda 2 (Azul), Banda 3 (Verde) e Banda 4 (Vermelho) para este tipo de análise. A combinação 4-3-2 para o canal RGB (*Red, Green, Blue*) foi utilizada para a geração de cenas *Sentinel-2* colorida no padrão Cor Verdadeira (*True Color*). Esta etapa está exposta na Figura 34 a seguir.

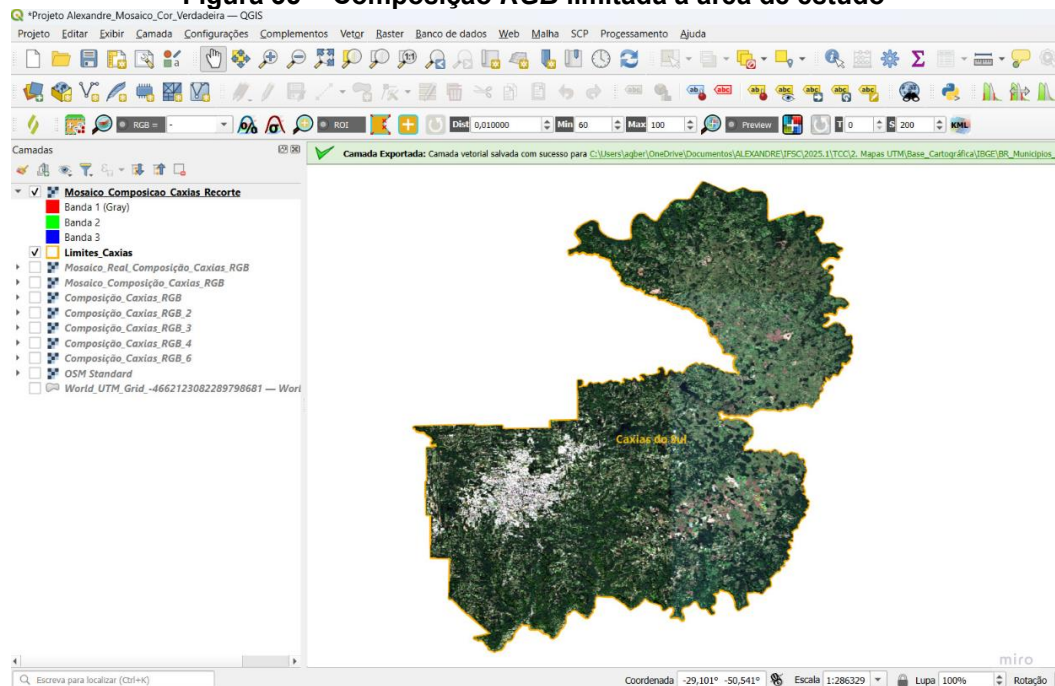
Figura 34 - Composição RGB a partir de imagens de satélite Sentinel-2



Fonte: Dias (2021, p. 64).

- c) **Delimitação da Área de Estudo:** Foi necessário realizar um mosaico de 4 cenas do Sentinel-2 para abranger a totalidade da área de Caxias do Sul/RS. O limite da área de estudo foi sobreposto ao mosaico de composição de imagens a partir do *shapefile* dos limites de Caxias do Sul/RS contido nos arquivos publicados conjuntamente com a carta de suscetibilidade do município desenvolvidas pelo CPRM (2017). A Figura 35 a seguir mostra a composição RGB limitada ao município de Caxias do Sul.

Figura 35 - Composição RGB limitada à área de estudo



Fonte: Elaboração Própria (2025).

- d) **Delimitação das Cicatrizes:** A identificação das áreas afetadas pelos movimentos de massa foi realizada com base na análise das cicatrizes de deslizamentos. Para isso, utilizou-se a comparação entre as composições em cores verdadeiras das imagens Sentinel-2 obtidas antes e depois do evento extremo de precipitação, por meio de sobreposição em software SIG. A identificação foi feita por fotointerpretação e as cicatrizes foram vetorizadas em camada *shapefile*. As Figuras 36 e 37 ilustram o processo de identificação das cicatrizes com base na comparação visual entre as imagens pré e pós-evento.

Figura 36 - Recorte da composição RGB Antes do evento extremo em Caxias do Sul



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 37 - Recorte da composição RGB Depois do evento extremo em Caxias do Sul – Cicatrizes Visíveis em Destaque



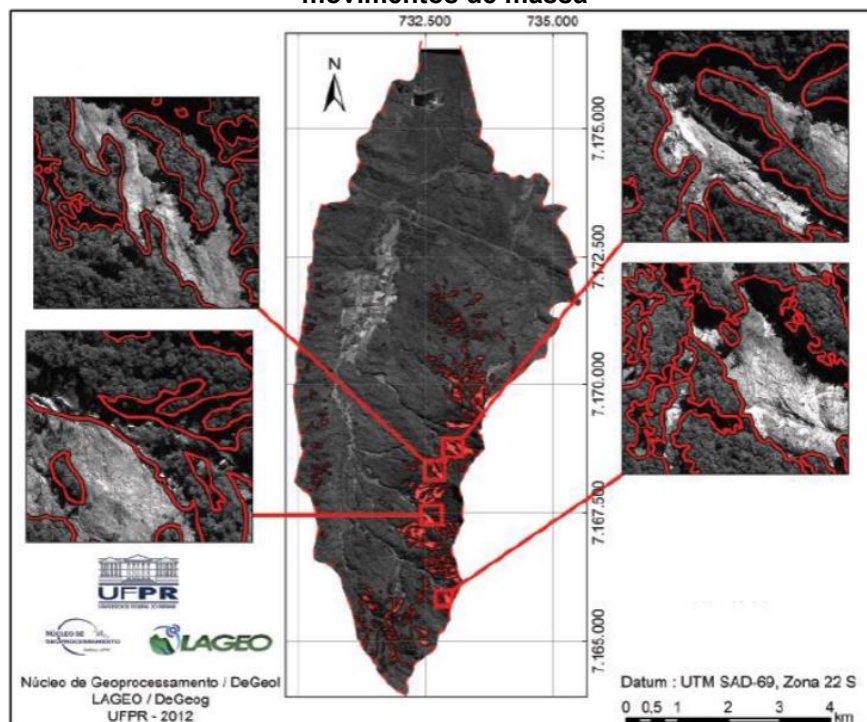
Fonte: Elaboração Própria (2025).

- e) **Quantificação dos Dados:** A partir do mapa de cicatrizes produzidos, do mapa de uso do solo do MapBiomás e da carta de suscetibilidade do município, realizou-se a quantificação das áreas atingidas pelos movimentos de massa. Isso incluiu obter a área e o perímetro das cicatrizes a partir da calculadora de campo, recurso nativo do QGIS, além de relacionar as regiões atingidas neste evento extremo com os dados preditivos da carta de suscetibilidade e usos do solo. Essa etapa

permitiu, por exemplo, identificar a classe de suscetibilidade em que a cicatriz do movimento de massa está inserida. Foram analisadas quanto à classe de suscetibilidade em que se localizam (alta, média ou baixa), à sua ocorrência em áreas de suscetibilidade específica (como regiões propensas a escorregamentos, corridas de massa ou inundações), e à associação com variáveis físicas do terreno, como relevo, declividade, geologia, pedologia e uso do solo, o que será detalhado na seção de Resultados.

- f) **Elaboração do *Layout* dos Mapas:** Por fim, o *layout* dos mapas foi preparado para apresentação. Isso envolve a inclusão de legendas, escalas e outros elementos cartográficos que facilitem a compreensão dos resultados obtidos. A Figura 38 a seguir apresenta um exemplo de *layout* do mapa de delimitação de cicatrizes de movimentos de massa elaborado por Pinto, Passos e Caneparo (2015), que foi usado como referência para a elaboração do *layout* dos mapas produzidos no presente trabalho.

Figura 38 - Exemplo de *layout* de mapa de delimitação de cicatrizes com zonas de origem de movimentos de massa



Fonte: Pinto, Passos e Caneparo (2015, p.138).

O conhecimento prévio destas etapas, adaptadas e aplicadas ao contexto de Caxias do Sul/RS, foram fundamentais para a retroanálise dos movimentos de massa e a avaliação da acurácia das previsões contidas na carta de suscetibilidade do município, descrita na unidade a seguir.

3.4 Retroanálise da carta de suscetibilidade

Após o mapeamento das cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa ocorridos em Caxias do Sul/RS em decorrência do evento extremo de precipitação, realizou-se uma comparação entre as áreas atingidas e as áreas previstas como prováveis para a ocorrência de movimentos de massa na carta de suscetibilidade do município, além da caracterização das áreas atingidas em relação ao uso do solo. O *shapefile* de cicatrizes foi sobreposto à carta de suscetibilidade do município, com o objetivo de viabilizar a retroanálise dos movimentos ocorridos. O presente estudo avalia a acurácia da carta de suscetibilidade do município e a potencial necessidade de revisão caso as áreas atingidas não estejam condizentes com a previsão ocorrida antes do evento, contida no documento.

O método de quantificação das cicatrizes de movimentos de massa mapeadas foi baseado em Cardozo *et al.* (2021). Os autores realizaram um inventário dos movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Mascarada/RS após o evento de precipitação extrema de janeiro de 2017. Os movimentos de massa foram caracterizados por meio de parâmetros geomorfológicos e através da comparação de seus parâmetros de forma com diferentes métodos de obtenção de áreas de análise, sendo os parâmetros propostos Porcentagem de Área Afetada (PAA) e Densidade de drenagem de cicatrizes (Ddc) (Cardozo *et al.*, 2021).

Cardozo *et al.* (2021) realizaram o mapeamento das cicatrizes dos escorregamentos a partir de imagens do satélite *Sentinel-2* com resolução de 10 m. Através de geoprocessamento usando *software* SIG ArcGis foram delimitadas as áreas dos escorregamentos. As análises geomorfológicas deram-se por sobreposição do mapa de uso do solo com os polígonos das cicatrizes mapeadas ao MDE adquirido da *NTT DATA Corporation*, resolução de 1m. A partir daí, calcularam os parâmetros

Porcentagem de Área Afetada (PAA) e Densidade de Cicatrizes (D_{cic}), respectivamente, com as Equações 1 e 2 a seguir:

a) PAA:

$$PAA = \frac{\sum A_{cic}}{A_{sub}} * 100 \quad (1)$$

Onde:

PAA = Porcentagem de área atingida (%)

A_{cic} = Área atingida pelas cicatrizes (km²)

A_{sub} = Área total da sub-bacia (km²)

b) D_{cic}:

$$D_{cic} = \frac{\sum N_{cic}}{A_{sub}} \quad (2)$$

Onde:

D_{cic} = Densidade de cicatrizes (N^o/km²)

N_{cic} = Número de cicatrizes

A_{sub} = Área total da sub-bacia (km²)

A unidade de análise ambiental do trabalho de Cardozo *et al.* (2021) foi uma bacia hidrográfica, enquanto a presente pesquisa propõe a análise de um município. Por este motivo, as fórmulas foram adaptadas modificando-se a área total da sub-bacia (A_{sub}) pela área do município (A_{mun}). A seguir, a Tabela 2 traz um resumo dos dados obtidos pelo estudo de Cardozo *et al.* (2021):

Tabela 2 - Número de cicatrizes, Área, Porcentagem de área atingida e Densidade de cicatrizes

Área de avaliação	Cicatrizes	Área (km ²)	PAA (%)	D _{cic} (N ^o /km ²)
Bacia do Mascarada	407	311,18	0,59	1,31
Sub-bacia Sumidouro	395	160,08	1,12	2,47
Sub-bacia Chuvisqueiro	12	27,45	0,19	0,44
Área de Influência	407	110,93	1,67	3,67

Fonte: Cardozo *et al.* (2021).

Foram realizados os cálculos propostos pelo método de Cardozo *et al.* (2021), após adaptações citadas, de maneira a quantificar os movimentos ocorridos. Além da análise quantitativa dos movimentos de massa a partir do método descrito, foi realizada análise qualitativa dos prováveis tipos de movimentos de massa ocorridos em decorrência do evento em questão, com base das previsões contidas na carta de suscetibilidade relativas à cada classe (alta, média e baixa), disponíveis no Quadro Legenda-A (Anexo B) da carta de suscetibilidade, citado anteriormente.

Para avaliar a concordância entre as áreas afetadas por movimentos de massa e o mapeamento prévio de suscetibilidade, Silva (2021) propõe a sobreposição do mapa de cicatrizes identificadas com a carta de suscetibilidade do município produzida pelo CPRM (2017), que o classifica em zonas de alta, média e baixa suscetibilidade e aponta regiões de suscetibilidades específicas. Para essa análise de acurácia, as cicatrizes foram mapeadas e vetorizadas no ambiente SIG QGIS, permitindo a obtenção de suas áreas e perímetros a partir da calculadora de campo do software. Em seguida, o *shapefile* contendo as cicatrizes foi sobreposto à carta síntese de suscetibilidade (que classifica as áreas em classes alta, média e baixa) e aos *shapefiles* das regiões de suscetibilidade específica (corrida de massa, escorregamento/solapamento e inundações), todos incorporados e manipulados no QGIS. Essa sobreposição permitiu classificar cada cicatriz de acordo com a classe e/ou região de suscetibilidade onde se localizava.

Todos os dados resultantes dessa classificação espacial foram exportados do QGIS e compilados em software de análise de dados, Microsoft Power BI (ferramenta livre e gratuita), onde foram calculadas a área total de cicatrizes para cada classe e região de suscetibilidade, bem como suas respectivas porcentagens em relação ao total de cicatrizes mapeadas. Estes dados foram representados nos gráficos que serão expostos na unidade a seguir. A acurácia da carta foi considerada elevada caso as cicatrizes apresentassem grande concentração nas classes de alta suscetibilidade (próximo a 90%), indicando uma boa previsão geral de risco. Adicionalmente, esperava-se que as regiões de suscetibilidade específica também concentrassem um número significativo das cicatrizes mapeadas, dada a magnitude do evento extremo de precipitação.

Para a análise da relação entre as áreas atingidas e o uso do solo, conforme detalhado na seção de Resultados (item 4.4), optou-se por utilizar o mapa de Uso e Cobertura do Solo fornecido pelo MapBiomas (conforme listado no Quadro 1), recortado para a área de estudo, que serviu como base de dados para classificar as cicatrizes mapeadas de acordo com o tipo de uso do solo, permitindo a medição da área e a porcentagem de cicatrizes para cada categoria de uso.

4 RESULTADOS

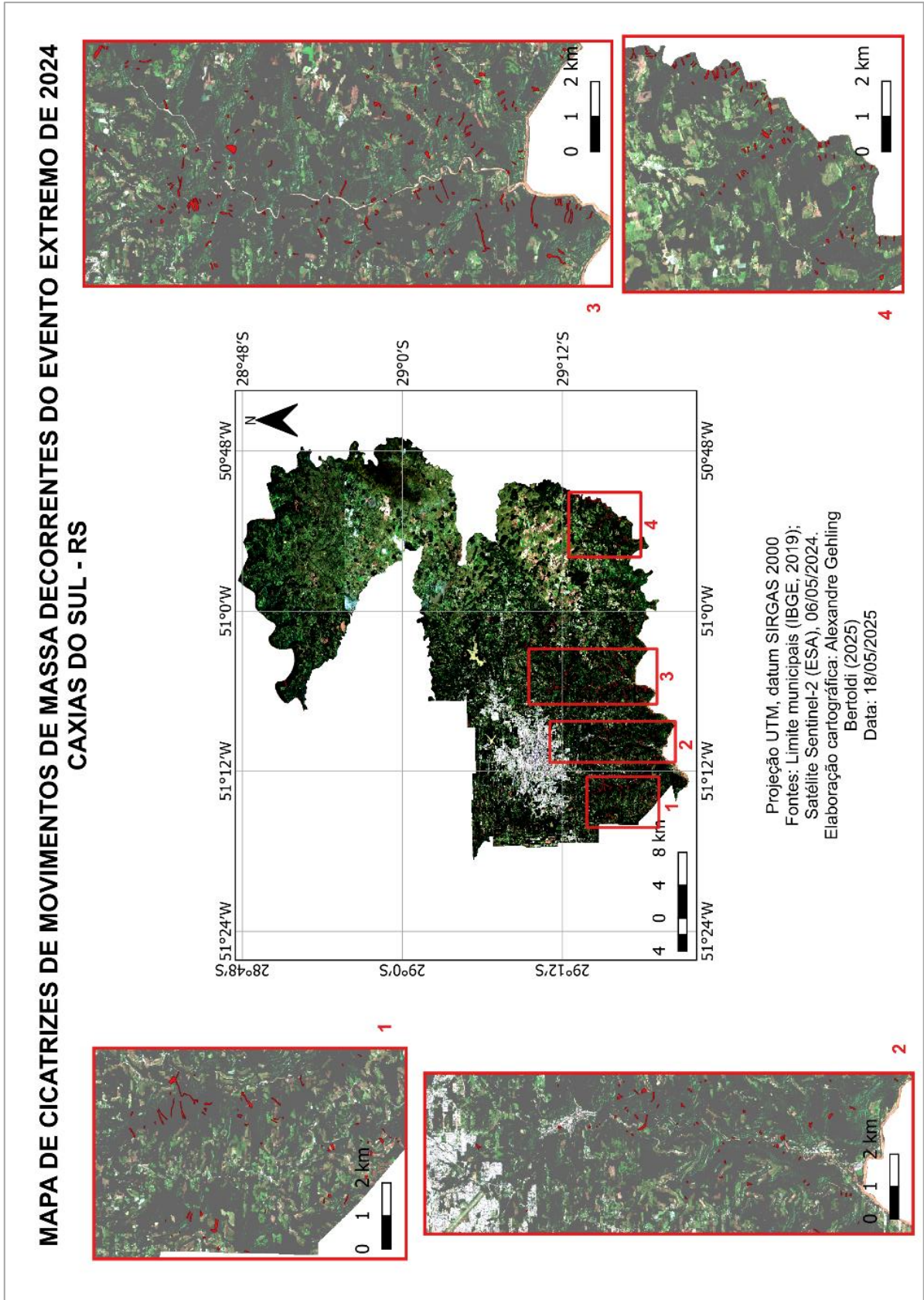
Neste item são apresentados os principais resultados desta pesquisa, abrangendo o mapeamento e a quantificação das cicatrizes dos movimentos de massa, a avaliação da acurácia da carta de suscetibilidade do município (tanto em suas classes gerais quanto nas regiões de suscetibilidade específica), e a análise das áreas atingidas em relação ao uso e ocupação do solo.

4.1 Mapa de Cicatrizes de Movimentos de Massa e Parâmetros Calculados

Para a elaboração do mapa de cicatrizes, optou-se por utilizar a composição em Cor Verdadeira (RGB) das imagens de satélite Sentinel-2 antes e depois do evento e realizar a identificação das cicatrizes dos movimentos de massa a partir de fotointerpretação, comparando ambas as camadas sobrepostas.

A fotointerpretação abrangeu a totalidade da área do município de Caxias do Sul (1.652,25 km²) e foram mapeadas 528 cicatrizes de movimentos de massa decorrentes do evento em questão, totalizando 26.731,8 m² de área atingida. Este valor foi obtido através da camada vetorial elaborada, que contém o polígono de cada cicatriz. A área e o perímetro destas cicatrizes foram obtidos a partir da calculadora de campo do QGIS. A Figura 39 a seguir traz o mapa de cicatrizes desenvolvido durante esta pesquisa, no qual se destacam as 4 regiões de maior concentração de cicatrizes, numeradas de 1-4 e aproximadas para melhor visualização dos polígonos dos locais de ocorrência em vermelho. As demais informações acerca das cicatrizes identificadas estão contidas no Apêndice A - Dados de Cicatrizes Mapeadas.

Figura 39 - Mapa de Cicatrizes de Movimentos de Massa Decorrentes do Evento Extremo de 2024 – Caxias do Sul/RS



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A partir dos dados obtidos pelo arquivo *shapefile* de cicatrizes produzido, foi realizado o cálculo dos parâmetros Porcentagem de Área Afetada/PAA (%) e Densidade de Cicatrizes/Dcic (Nº/km²) conforme equações 1 e 2, que estão dispostos juntamente com a Área do Município (km²), o Número de Cicatrizes mapeadas e a Área de Cicatrizes (km² e m²) na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Resumo de Dados Obtidos e Parâmetros Calculados – Cicatrizes Mapeadas

Área do Município [km ²]	Número de Cicatrizes	Área de Cicatrizes [km ²]	Área de Cicatrizes [m ²]	PAA [%]	Dcic [Nº/km ²]
1.652,32	528	0,0267318	26.731,8	0,0016	0,32

Fonte: Elaboração Própria (2025).

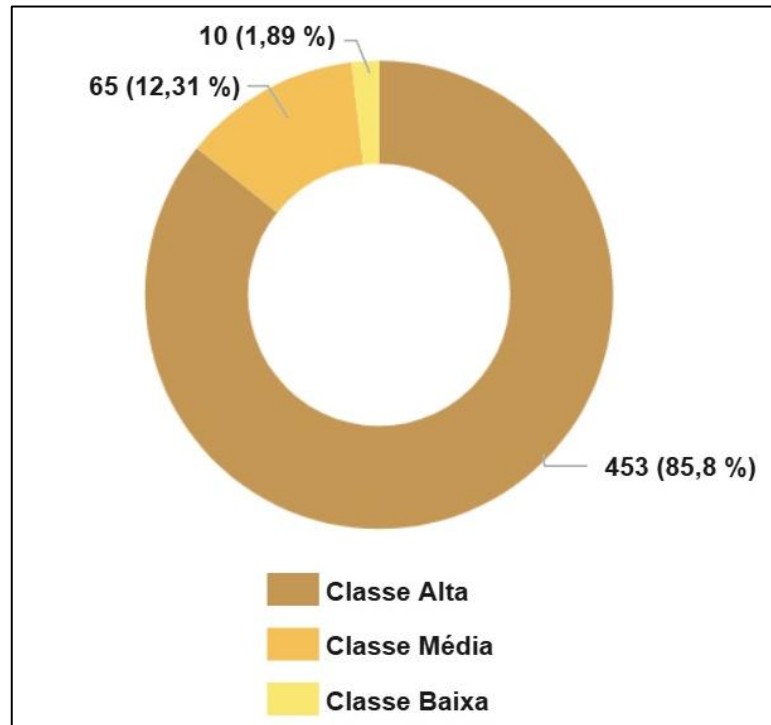
A Tabela 3 sintetiza os resultados quantitativos do mapeamento dos movimentos de massa. O elevado número de cicatrizes identificadas (528) demonstra a ocorrência elevada de movimentos de massa no município depois do evento extremo analisado. Contudo, a Porcentagem de Área Afetada (PAA) de 0,0016% e a Densidade de Cicatrizes (Dcic) de 0,32 cicatrizes/km² indicam que, embora numerosos, esses movimentos impactaram uma fração relativamente pequena da área total de Caxias do Sul. Estes valores serão explorados mais detalhadamente a seguir.

4.2 Retroanálise da Carta quanto às Classes de Suscetibilidade

A sobreposição da carta de suscetibilidade com o *shapefile* de cicatrizes produzido permitiu a identificação da classe de suscetibilidade onde ocorreram os movimentos de massa.

Do total de 528 cicatrizes, foram identificadas 453 cicatrizes localizadas em regiões de classe alta (85,8%), 65 cicatrizes em regiões de classe média (12,31%) e 10 cicatrizes em regiões de classe baixa (1,89%). Tais informações estão representadas no Gráfico 6 a seguir.

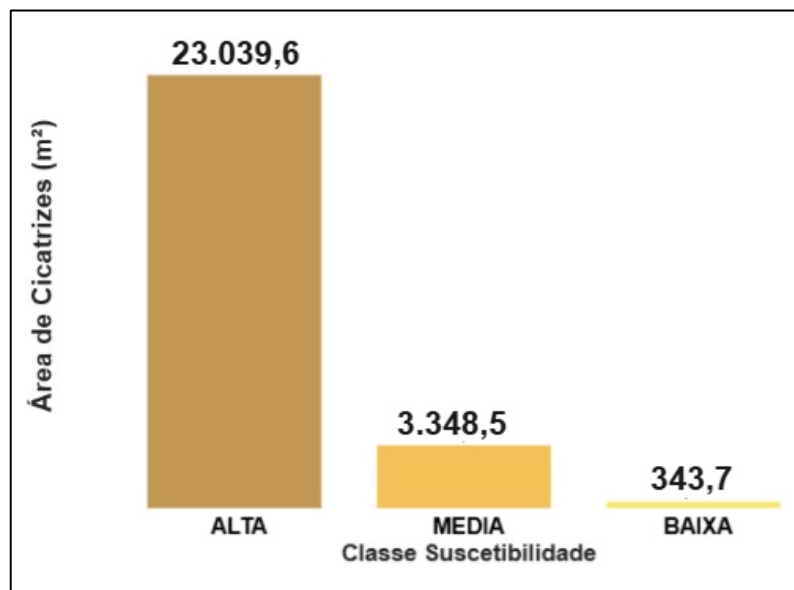
Gráfico 6 - Número de Cicatrizes por Classe de Suscetibilidade



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Com relação à área de cicatrizes dispostas em cada classe, 23.039,6 m² estão em região de classe alta, 3.348,5 m² em região de classe média e 343,7 m² em região de classe baixa, o que pode ser verificado no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Área de Cicatrizes (m²) por Classe de Suscetibilidade



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A carta de suscetibilidade relaciona cada classe com informações advindas dos mapas hipsométrico, de declividade e de relevo, além de de relatórios de campo, o que permite a relação entre a área de cicatrizes mapeadas e dados de relevo, altitude, declividade, litologia, solos e prováveis processos ocorridos em cada classe, que estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo do Quadro-Legenda A – Suscetibilidade a Movimentos de Massa

Classe Suscetibilidade	Relevo	Altitude	Declividade	Litologia	Solos	Processos
ALTA	Vales Encaixados, Degraus Estruturais, Morros Altos	250 m - 500 m	20° - 45°	Sequência vulcânica de basaltos a andesitos; arenitos	Moderadamente evoluídos e pouco profundos;	Deslizamento, queda e rolamento de blocos
MEDIA	Vales Encaixados, Morros Altos, Morros Baixos	100 m - 250 m	10° - 30°	Sequência vulcânica de basaltos a andesitos	Moderadamente evoluídos e moderadamente profundos	Deslizamento, queda de blocos, rastejo, ravinamento
BAIXA	Planícies e Terraços Fluviais, Colinas, Planaltos, Patamares, Morros Baixos, Rampas de alúvio-colúvio	< 100 m	< 15°	Sequência vulcânica de basaltos a andesitos e sedimentos quaternários inconsolidados	Aluviais; evoluídos e profundos	Rastejo, ravinamento, voçoroca e erosão laminar

Fonte: Adaptado de CPRM (2017, p. 1).

Relacionando os dados da Carta de Suscetibilidade de Caxias do Sul/RS produzida pelo CPRM (2017) com os dados de cicatrizes mapeadas neste estudo, pode-se classificar as cicatrizes identificadas de acordo com os dados contidos na tabela acima:

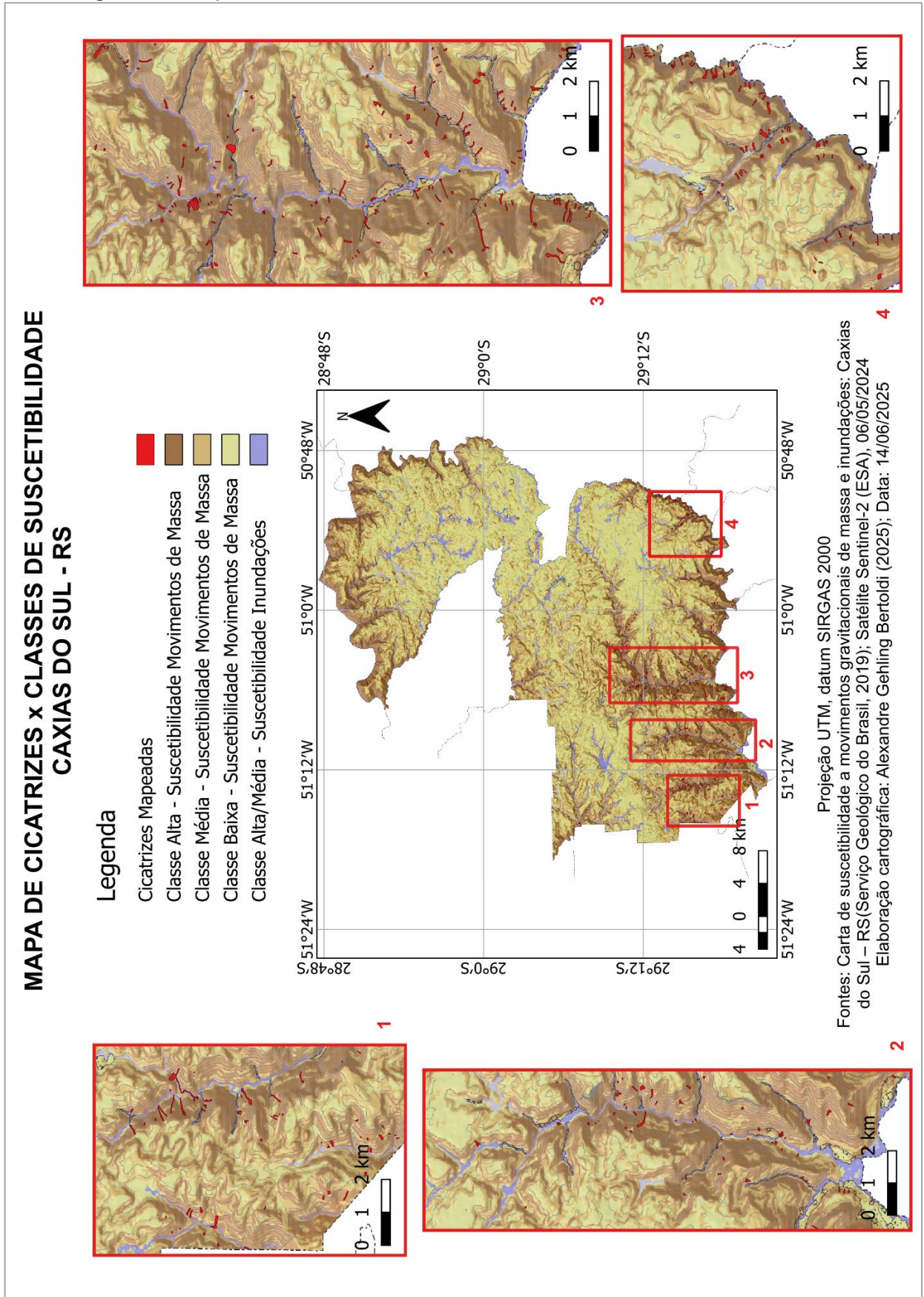
- a) 85,6% das cicatrizes mapeadas (classe alta) ocorreram em regiões de relevo de vales encaixados, degraus estruturais e morros altos; a altitudes entre 250m e 500m; em declividades entre 20° e 45°; em regiões de litologia com sequência vulcânica de basaltos a andesitos e arenitos; atingindo solos moderadamente evoluídos e pouco profundos e possivelmente relacionam-se a processos de deslizamento, queda e rolamento de blocos.
- b) 12,31% das cicatrizes mapeadas (classe média) ocorreram em regiões de relevo de vales encaixados, morros altos e baixos; a altitudes entre 100m e 250m; em declividades entre 10° e 30°; em regiões de litologia com sequência vulcânica de basaltos a andesitos; atingindo solos moderadamente evoluídos e moderadamente profundos e

possivelmente relacionam-se a processos de deslizamento, queda de blocos, rastejo e ravinamento.

- c) 1,89% das cicatrizes mapeadas (classe baixa) ocorreram em regiões de relevo de planícies e terraços fluviais, colinas, planaltos, patamares, morros baixos, rampas de alúvio-colúvio; a altitudes menores que 100m; em declividades menores que 15°; em regiões de litologia com sequência vulcânica de basaltos a andesitos e sedimentos quaternários inconsolidados; atingindo solos aluviais evoluídos e profundos e possivelmente relacionam-se a processos de rastejo, ravinamento, voçoroca e erosão laminar.

O Mapa de Cicatrizes x Classes de Suscetibilidade está disposto na Figura 40 a seguir.

Figura 40 - Mapa de Cicatrizes x Classes de Suscetibilidade – Caxias do Sul/RS



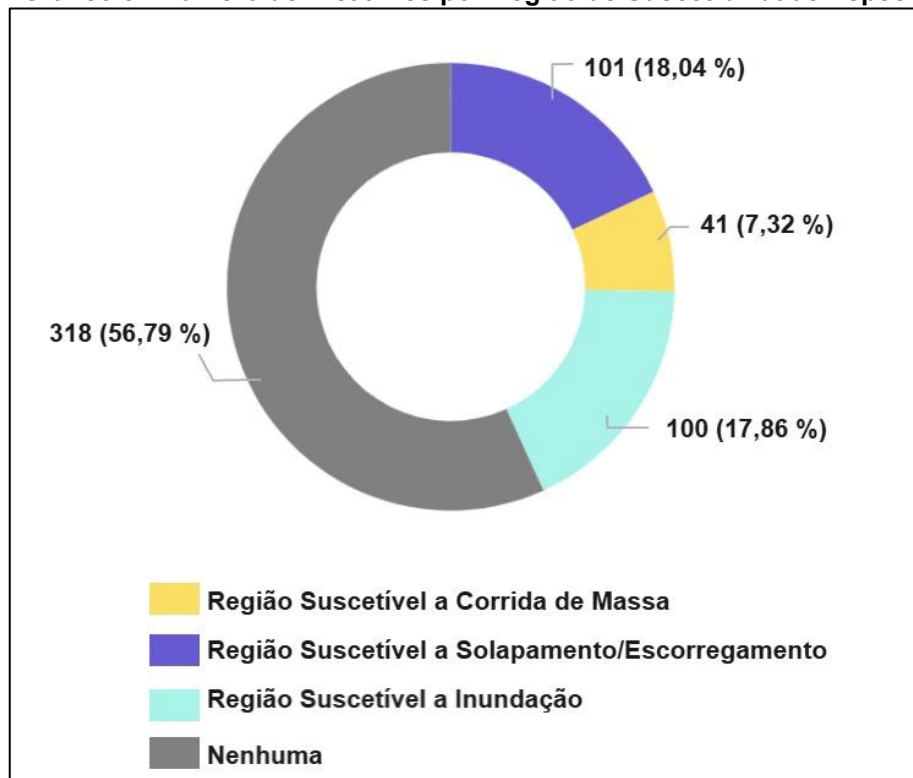
Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.3 Retroanálise da Carta quanto às Regiões de Suscetibilidade Específica

Além da divisão entre as classes de suscetibilidade alta, média e baixa, a carta produzida pelo CPRM traz também os *shapefiles* que delimitam regiões de suscetibilidade específicas a: Corridas de Massa, Solapamento/Escorregamento e Inundações. Foi realizada a sobreposição do *shapefile* de cicatrizes produzido com os *shapefiles* de regiões de suscetibilidade específica, sendo possível relacionar o número e a área de cicatrizes com as regiões de suscetibilidade a corrida de massa, solapamento/escorregamento e inundações.

Do total de 528 cicatrizes, 318 cicatrizes se localizaram fora das regiões de suscetibilidade específica (56,79%), ou seja, não há uma designação de classe provável de movimento de massa para estes locais, 101 cicatrizes em regiões de suscetibilidade a solapamento/escorregamento (18,04%), 100 cicatrizes em regiões de suscetibilidade a inundações (17,86%) e 41 cicatrizes em regiões de suscetibilidade a corrida de massa (7,32%). Tais informações estão representadas no Gráfico 8 a seguir.

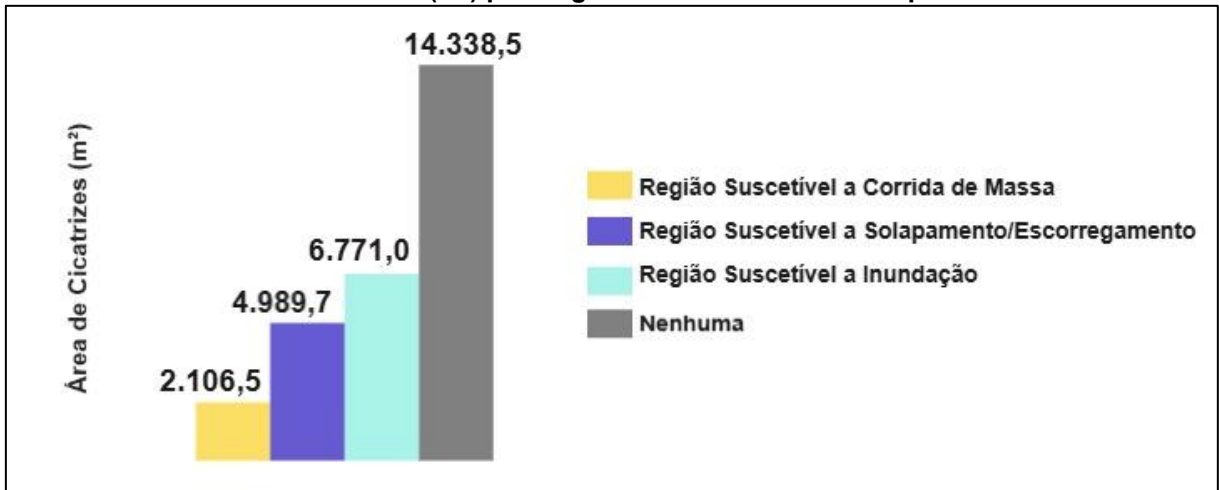
Gráfico 8 - Número de Cicatrizes por Região de Suscetibilidade Específica



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Com relação ao quantitativo da área de cicatrizes dispostas em cada região de suscetibilidade específica (que não engloba a totalidade o mapa), 14.338,5 m² não estão em nenhuma destas regiões, 6.771,0 m² na região de inundações, 4.989,7 m² na região relativa a solapamento/escorregamento e 2.106,5 m² na região de corrida de massa, o que está representado no Gráfico 9. O número alto de cicatrizes em regiões sem classificação específica indica que, devido à magnitude deste evento extremo, novas áreas foram atingidas e há possibilidade de incorporação das ocorrências a partir desta retroanálise para aprimoramento da carta do município.

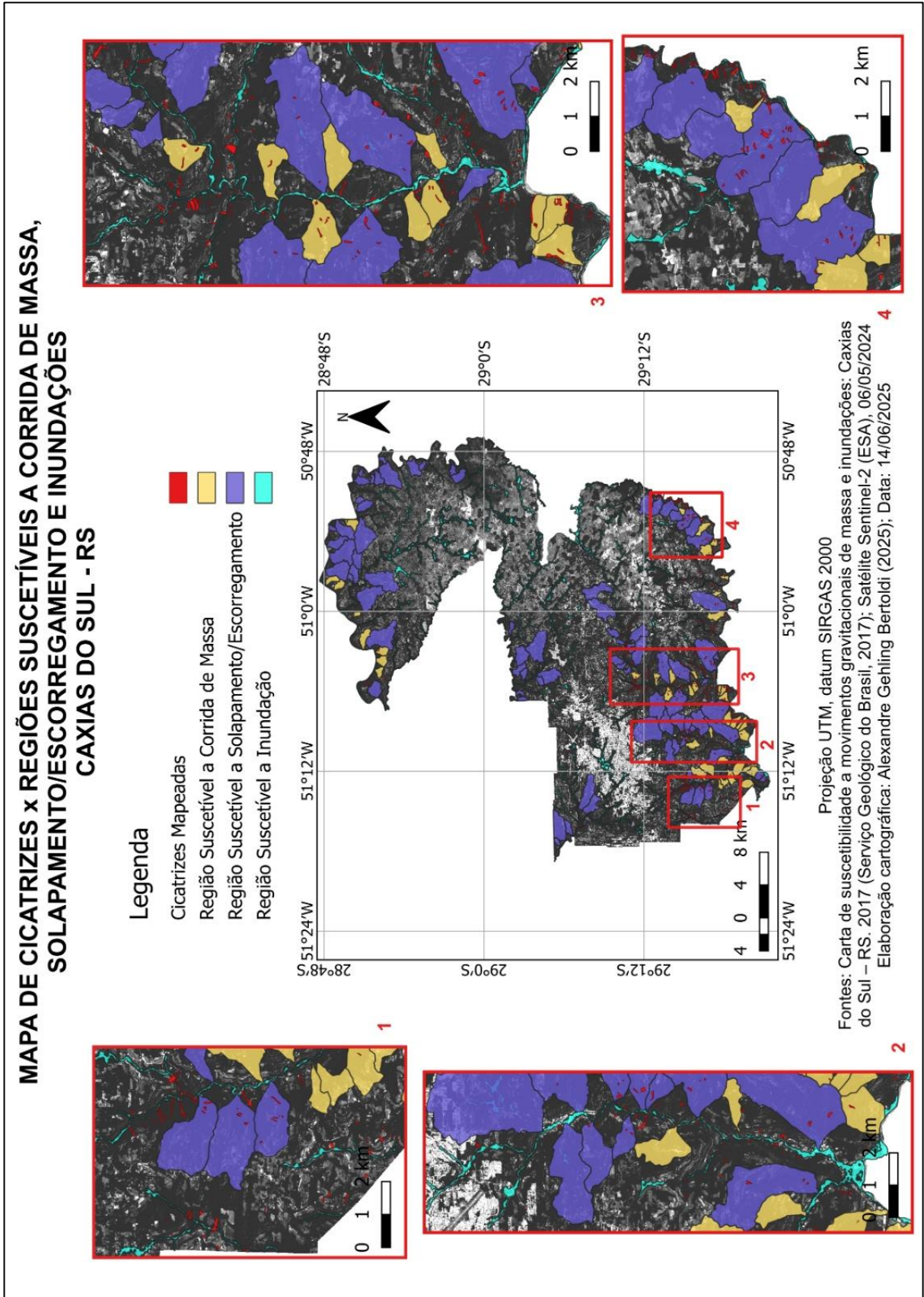
Gráfico 9 - Área de Cicatrizes (m²) por Região de Suscetibilidade Específica



Fonte: Elaboração Própria (2025).

O Mapa de Cicatrizes x Áreas Suscetíveis a Corrida de Massa, Escorregamento/Solapamento e Inundação está disposto na Figura 41 a seguir:

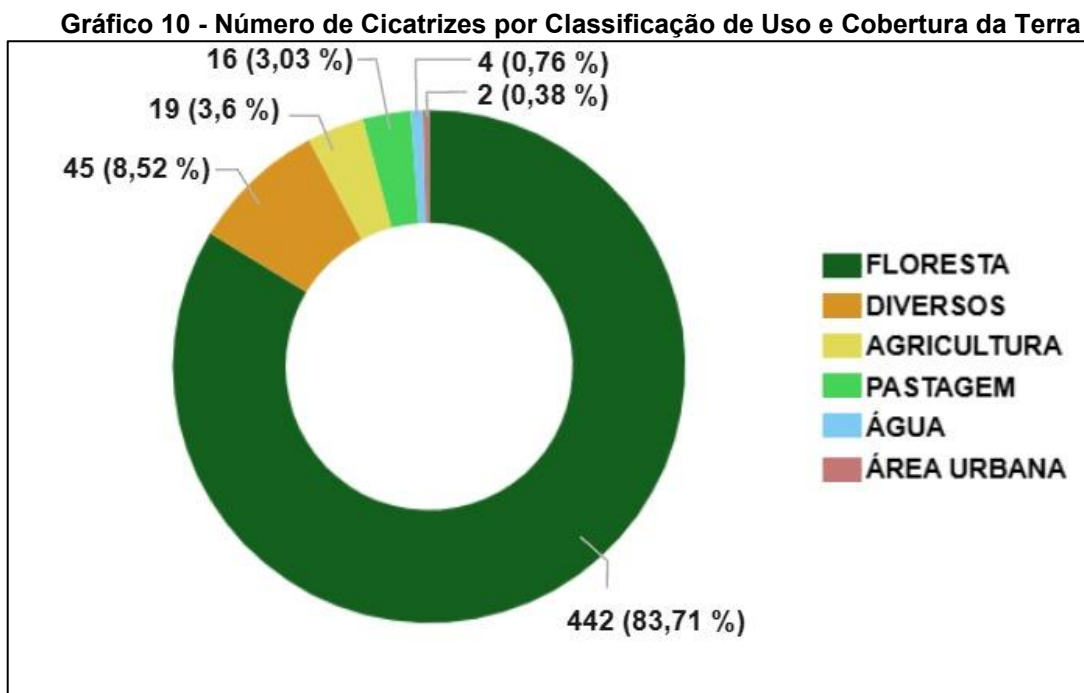
Figura 41 - Mapa de Cicatrizes x Áreas Suscetíveis a Corrida de Massa, Escorregamento/Solapamento e Inundação



Fonte: Elaboração Própria (2025).

4.4 Análise das Áreas Atingidas com relação ao Uso do Solo

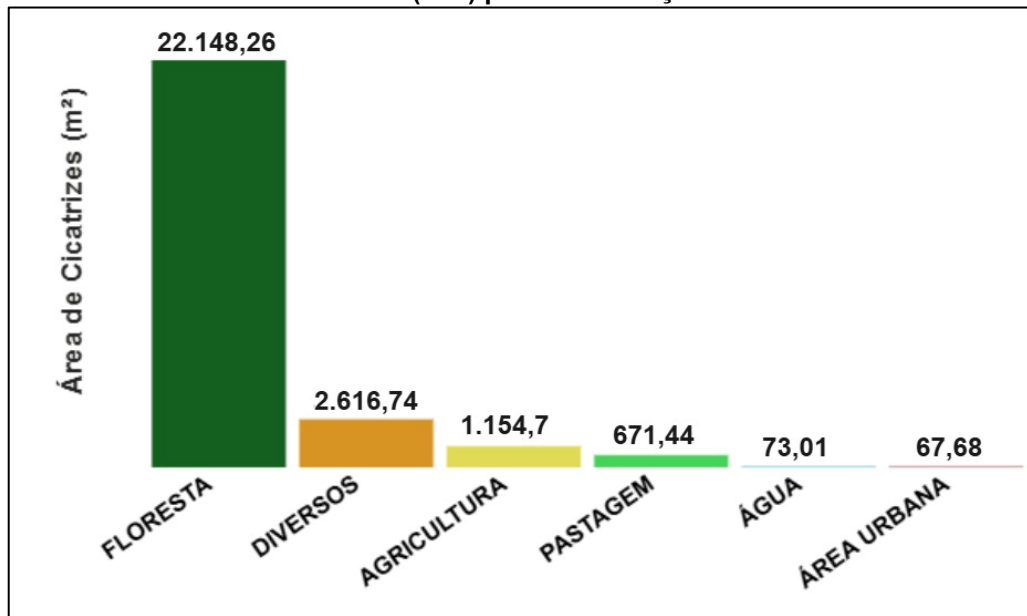
Para a análise das áreas atingidas em relação ao uso do solo, utilizou-se as informações fornecidas pelo MapBiomass (2024), referentes ao estado do Rio Grande do Sul. A partir da sobreposição do Mapa de Uso e Cobertura da Terra do MapBiomass com o *shapefile* de cicatrizes produzido, chegou-se aos seguintes dados: do total de 528 cicatrizes mapeadas, 442 localizaram-se em áreas de Florestas (83,71%), 45 cicatrizes em áreas de Usos Diversos - o que abrange desde infraestruturas como rodovias, até atividades industriais, áreas degradadas e outras áreas com uso misto ou não facilmente classificáveis (8,52%), 19 cicatrizes em áreas de Agricultura (3,6%), 16 cicatrizes em áreas de Pastagem (3,03%), 4 cicatrizes em áreas de Água (0,76%) e 2 cicatrizes em Áreas Urbanas (0,38%), o que pode ser visualizado no Gráfico 10.



Fonte: Elaboração Própria (2025).

A área de cicatrizes por classe de uso do solo se dispõe da seguinte maneira: 22.148,26 m² em Florestas, 2.616,74 m² em Usos Diversos, 1.154,7 m² em Agricultura, 671,44 m² em Pastagem, 73,01 m² em Água e 67,68 m² em Área Urbana. Tais informações estão dispostas no Gráfico 11 a seguir.

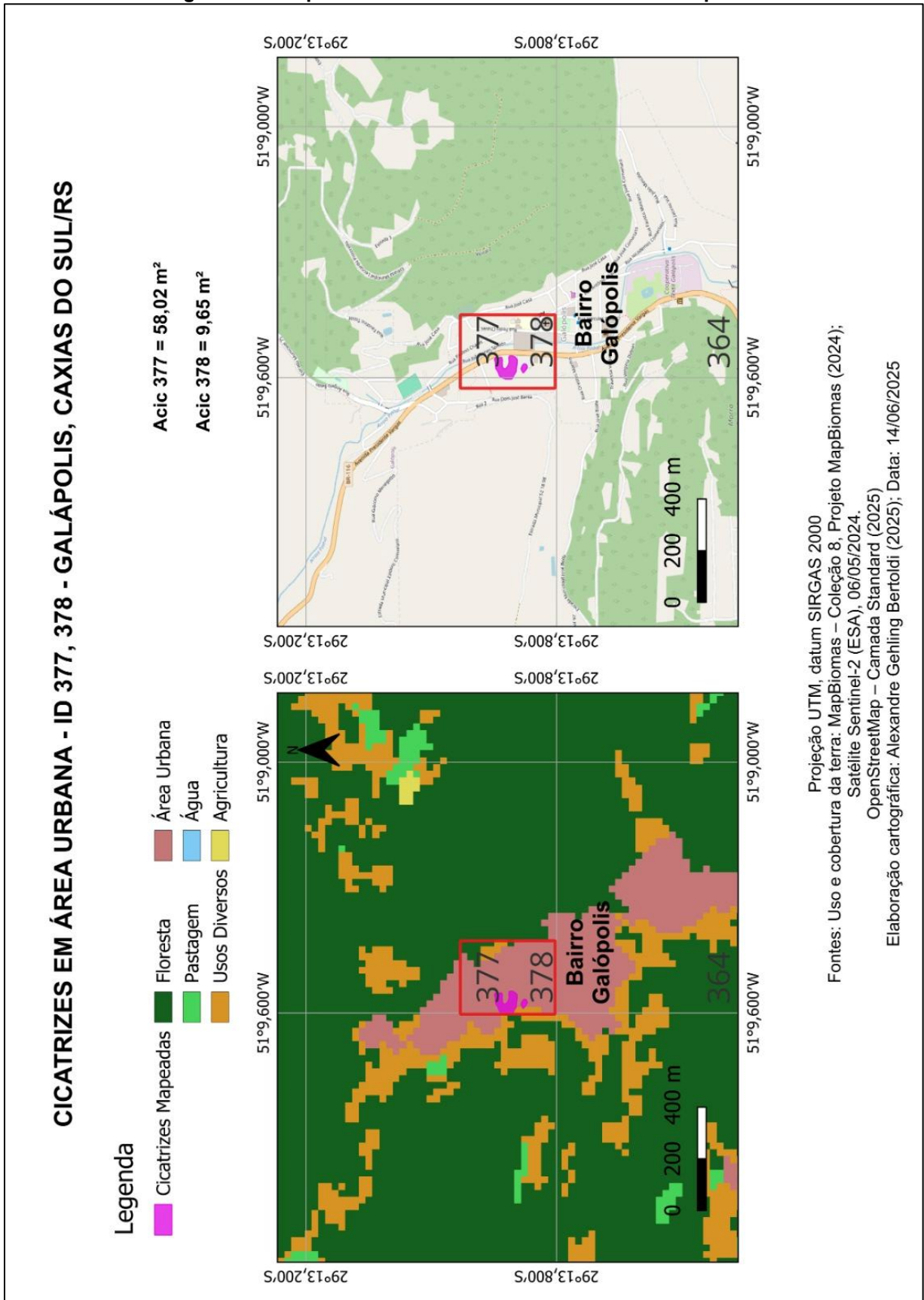
Gráfico 11 - Área de Cicatrizes (km²) por Classificação de Uso e Cobertura da Terra



Fonte: Elaboração Própria (2025).

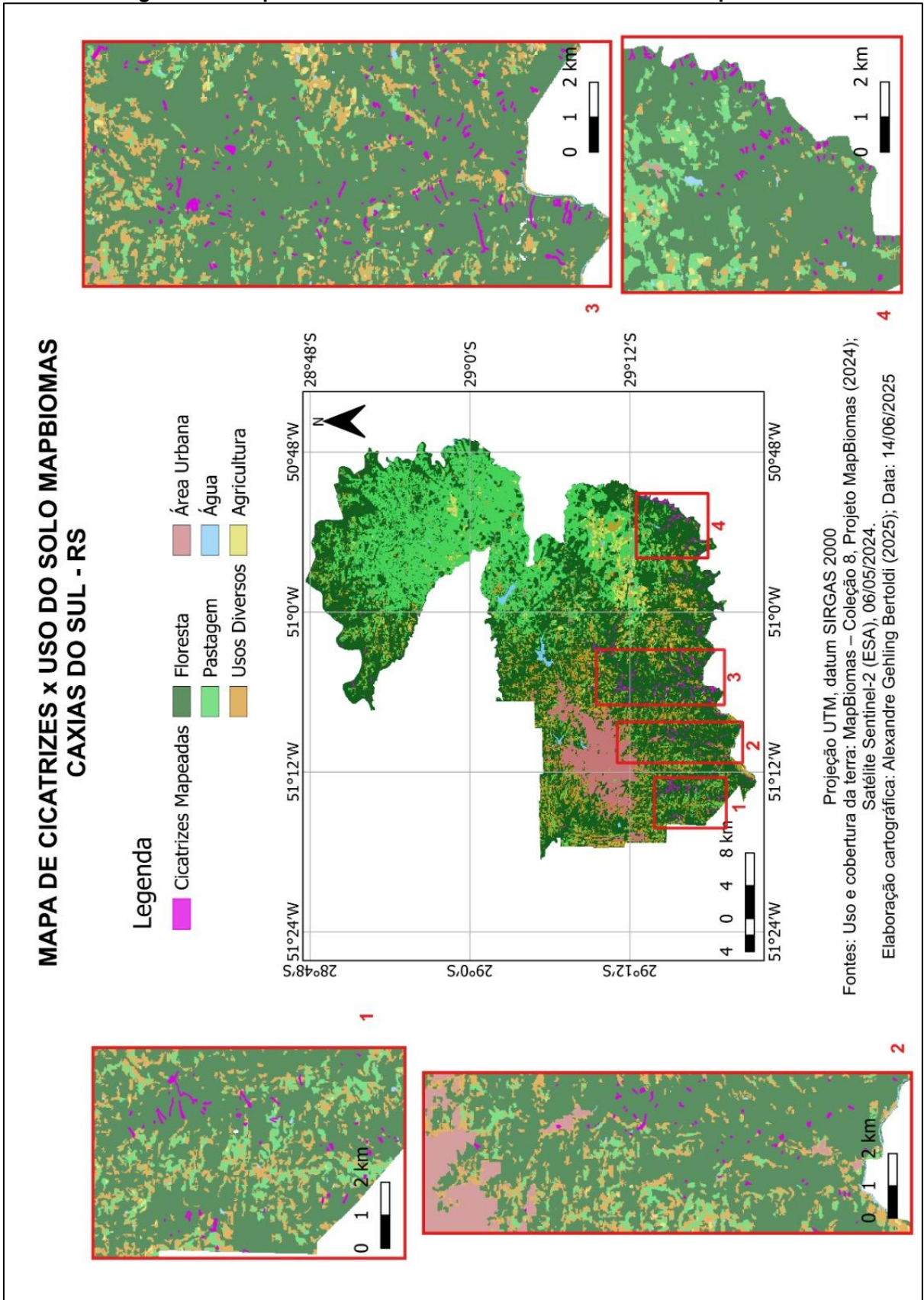
As duas cicatrizes que atingiram Áreas Urbana (id 377 e 378), ocorreram no bairro Galápolis, que apresenta formação geológica composta pelo Dacito Galápolis, citado anteriormente. A área destas cicatrizes foi de 58,02 m² e 9,65 m². A classe de suscetibilidade a movimentos de massa da região destas cicatrizes é alta (declividades entre 20° e 45°). O mapa da região de Galápolis evidenciando as cicatrizes em área urbana pode ser visualizado na Figura 42 a seguir, enquanto a Figura 43 traz o Mapa de Cicatrizes x Uso e Cobertura do Solo para a totalidade do município.

Figura 42 - Mapa de cicatrizes em Áreas Urbanas – Galápolis



Fonte: Elaboração Própria (2025).

Figura 43 - Mapa de Cicatrizes x Uso e Cobertura da Terra MapBiomias



Fonte: Elaboração Própria (2025)

4.5 Acurácia da Carta de Suscetibilidade do Município

A análise dos resultados quantitativos demonstra que a carta de suscetibilidade do município de Caxias do Sul CPRM (2017) apresenta uma boa acurácia em sua previsão geral de áreas de risco, dado que a maioria das cicatrizes mapeadas (85,8%) se localizou nas classes de alta suscetibilidade. Isso sugere que a carta está, de fato, próxima da realidade de campo para a identificação de zonas de maior propensão a movimentos de massa. Com relação às classes de suscetibilidade, todas as cicatrizes se enquadraram em alguma classe (alta, média ou baixa), pois o mapeamento abrange a totalidade do território. Contudo, a correspondência entre as cicatrizes e as regiões de suscetibilidade específica (corrida de massa, escorregamento/solapamento e inundações) foi pouco expressiva, pois 56,79% das cicatrizes não estão em uma região de suscetibilidade específica, indicando um ponto onde a carta poderia ser aprimorada para refletir com mais precisão os tipos de movimentos esperados. Como consequência da magnitude deste evento, novas áreas foram atingidas, o que demonstra o valor destes dados para melhores previsões futuras. Estes pontos serão abordados com mais detalhes na sessão de discussões e conclusão a seguir, assim como serão realizadas demais análises com relação às áreas atingidas.

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal realizar uma retroanálise dos movimentos de massa ocorridos em Caxias do Sul/RS em decorrência do evento extremo de precipitação ocorrido entre abril e maio de 2024, comparando-os com as previsões de suscetibilidade existentes na carta de suscetibilidade do município. Os resultados obtidos permitiram quantificar a extensão dos desastres e avaliar a acurácia das ferramentas de mapeamento e das políticas de planejamento territorial vigentes. A atualização deste mapeamento é importante tendo em vista que as previsões podem apresentar um desvio em relação ao cenário real devido à evolução dos desequilíbrios ambientais e a alteração da frequência e intensidade das chuvas.

A análise demonstrou a importância de estudos e cartas de suscetibilidade para prevenir a construção em áreas de risco de ocorrência de movimentos de massa. Conforme os dados apresentados, a vasta maioria das cicatrizes de movimentos de massa identificadas no estudo, totalizando 453 ocorrências (85,8% do total) e 23.039,6 m² da área mapeada de movimentos, concentrou-se em regiões classificadas como de "alta suscetibilidade" a movimentos gravitacionais de massa. Tais áreas, caracterizadas por vales encaixados, degraus estruturais e morros altos, cujas altitudes variam entre 250m e 500m, possuem declividades acentuadas (20° a 45°) e solos pouco profundos. Estas regiões são intrinsecamente desfavoráveis à ocupação urbana devido ao elevado risco de deslizamento, queda e rolamento de blocos. A grande concentração de movimentos de massa na classe alta de suscetibilidade indica boa acurácia da previsão contida na carta de suscetibilidade do CPRM (2017) para a identificação de áreas gerais de risco e comprova boa aplicabilidade deste documento na previsão de regiões suscetíveis considerando um evento de tal magnitude.

Por outro lado, embora a maioria das cicatrizes tenha atingido classes altas de suscetibilidade a movimentos de massa, as regiões delimitadas especificamente como suscetíveis a corridas de massa, escorregamento/solapamento e inundações não foram proporcionalmente atingidas pelas cicatrizes do estudo em questão. Dos 528 movimentos de massa mapeados, mais da metade (56,79%) não se enquadraram em nenhuma das regiões de suscetibilidade específica. Este cenário sugere que,




potencialmente, essas áreas que preveem tipos de ocorrências específicas possam ser revistas a partir da incorporação desta retroanálise.

O fato de mais da metade das cicatrizes não se enquadrarem em nenhuma das regiões de suscetibilidade específica pode ser explicado justamente pela magnitude do evento extremo de 2024, que superou recordes históricos de precipitação e níveis de rios. Novas áreas do município foram atingidas pelos movimentos de massa que diferem dos eventos pretéritos, tendo em vista os níveis de precipitação atingidos. Ou seja, estes dados são de grande valia para a atualização da carta de suscetibilidade a movimentos de massa do município, pois indicam novos locais de prováveis ocorrências futuras frente ao cenário de crescentes eventos extremos. Isso reforça a premissa de Bitar (2014) sobre o valor das retroanálises para integrar novas informações, otimizar a acurácia das previsões e, assim, promover um planejamento territorial e uma gestão de riscos mais eficientes e adaptáveis ao cenário atual.

Com relação ao tipo de uso do solo do local dos movimentos de massa mapeados, a maioria (83,71%) ocorreu em áreas de Florestas, enquanto apenas duas cicatrizes (0,38%) foram identificadas em Áreas Urbanas, especificamente no bairro Galópolis. Estas cicatrizes, que somam uma área de 67,67 m², ocorreram em uma região cuja formação geológica é composta por Dacitos Galópolis. A característica plástica desses solos, que se deformam facilmente em contato com a água, conforme descrito por Borsatto *et al.* (2015), combinada com a declividade acentuada do terreno neste local (entre 20° e 45°) pode ter contribuído para a ocorrência desses movimentos de massa em um ambiente urbano. Este fato ressalta a importância de considerar as particularidades geológicas locais no planejamento urbano e na gestão de riscos.

Em suma, o estudo reitera a validade das cartas de suscetibilidade como instrumentos preditivos gerais para movimentos de massa, mas aponta para a necessidade contínua de atualização e detalhamento, especialmente no que se refere às delimitações de suscetibilidades a tipos específicos de movimentos, para que possam refletir com maior precisão a dinâmica dos desastres em um cenário de crescente intensidade de eventos climáticos extremos.



ANEXO B – Quadro Legenda-A – Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa

QUADRO-LEGENDA A - SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA						
Classe	Foto ilustrativa	Características predominantes	Área		Área urbanizada/edificada	
			km ²	% (*)	km ²	% (**)
Alta		<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: vales encaixados, degraus estruturais, escarpas de borda de planalto, morros altos; • Forma das encostas: côncavas a retilíneas; • Amplitudes: 100 a 500 m; • Declividades: 20 a 45°, paredes sub-verticais; • Litologia: sequência vulcânica de basaltos a andesitos; arenitos; • Densidade de lineamentos/estruturas: média/alta; • Solos: moderadamente evoluídos e pouco profundos; • Processos: deslizamento, queda e rolamento de blocos. 	379,31	23,20	2,87	3,30
Média		<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: vales encaixados; morros altos, morros baixos; • Forma das encostas: convexas a retilíneas e côncavas, com topos planos; • Amplitudes: 100 a 250 m; • Declividades: 10 a 30°; • Litologia: sequência vulcânica de basaltos a andesitos; • Densidade de lineamentos/estruturas: média/baixa; • Solos: moderadamente evoluídos e moderadamente profundos; • Processos: deslizamento, queda de blocos, rastejo, ravinação. 	488,47	29,88	20,75	23,87
Baixa		<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: planícies e terraços fluviais, colinas, planaltos, patamares litoestruturais, morros baixos, rampas de alúvio-colúvio; • Forma das encostas: convexas suavizadas e topos amplos e planos; • Amplitudes: < 100 m; • Declividades: < 15°; • Litologia: sequência vulcânica de basaltos a andesitos e sedimentos quaternários inconsolidados; • Densidade de lineamentos/estruturas: baixa; • Solos: aluviais; evoluídos e profundos; • Processos: rastejo, ravinação, voçoroca e erosão laminar. 	766,83	46,92	63,31	72,83

(*) Percentagem em relação à área do município. (**) Percentagem em relação à área urbanizada/edificada do município.

Fonte: CPRM (2017, p. 1).

ANEXO C – Quadro Legenda-B – Suscetibilidade a Inundações

QUADRO-LEGENDA B - SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES						
Classe	Foto ilustrativa	Características predominantes	Área		Área urbanizada/edificada	
			km ²	% (*)	km ²	% (**)
Alta		<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: planícies aluviais atuais com amplitudes e declividades muito baixas (< 3°) e rampas de colúvio-alúvio com amplitudes variadas e declividades baixas (5 a 10°); • Solos: hidromórficos, em terrenos situados ao longo de curso d'água, mal drenados e com nível d'água subterrâneo aflorante a raso; • Altura de inundação: abaixo de 3 m em relação à borda da calha do leito regular do curso d'água; • Processos: inundação, enchente, solapamento de margem e assoreamento. 	60,70	3,72	4,72	5,43
Média		<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: planícies aluviais atuais com amplitudes e declividades muito baixas (< 3°) e rampas de colúvio-alúvio com amplitudes variadas e declividades baixas (5 a 10°); • Solos: hidromórficos e não hidromórficos, em terrenos argilo-arenosos e com nível d'água subterrâneo raso a pouco profundo; • Altura de inundação: entre 3 e 5 m em relação à borda da calha do leito regular do curso d'água; • Processos: inundação, enchente, solapamento de margem e assoreamento. 	35,43	2,16	0,69	0,79

(*) Percentagem em relação à área do município. (**) Percentagem em relação à área urbanizada/edificada do município.

Fonte: CPRM (2017, p. 1).

APÊNDICE A – Tabela de Dados das Cicatrizes Mapeadas

Id Cicatriz	Area [m ²]	Perímetro [m]	Susc. Corrida Massa	Susc. Solapamento/ Escorregamento	Susc. Inundação	Classe Suscetibilidade	Uso do Solo
1	23,08	23,26	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
2	50,85	29,13	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
3	107,71	42,52	-	-	SIM	ALTA	DIVERSOS
4	28,08	28,04	-	-	SIM	ALTA	DIVERSOS
5	10,68	15,40	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
6	22,73	21,55	-	-	-	ALTA	FLORESTA
7	13,11	15,88	-	-	-	ALTA	FLORESTA
8	13,07	14,20	-	-	-	ALTA	FLORESTA
9	7,40	10,85	-	-	-	ALTA	FLORESTA
10	84,08	55,53	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
11	84,42	58,96	-	-	SIM	MEDIA	DIVERSOS
12	321,72	118,94	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
13	34,99	24,04	-	-	-	ALTA	FLORESTA
14	21,10	26,74	-	-	-	MEDIA	DIVERSOS
15	53,51	34,61	-	-	-	ALTA	FLORESTA
16	70,75	33,80	-	-	-	MEDIA	DIVERSOS
17	102,44	67,74	-	-	-	ALTA	FLORESTA
18	75,00	35,72	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
19	67,63	37,19	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
20	22,79	20,53	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
21	108,74	49,04	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
22	85,44	44,25	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
23	50,99	32,91	-	-	-	MEDIA	DIVERSOS
24	41,19	42,21	-	-	SIM	ALTA	DIVERSOS
25	20,37	34,35	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
26	11,36	22,84	-	-	-	ALTA	FLORESTA
27	8,69	13,76	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
28	33,76	28,62	-	-	-	MEDIA	DIVERSOS
29	134,53	53,32	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
30	32,44	38,41	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
31	10,22	18,38	-	-	-	ALTA	FLORESTA
32	6,38	12,67	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
33	15,75	23,08	-	-	-	ALTA	FLORESTA
34	10,50	16,62	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
35	21,60	20,38	SIM	-	-	MEDIA	FLORESTA
36	11,61	18,05	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
37	6,93	10,57	-	-	-	ALTA	FLORESTA
38	117,72	71,16	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
39	28,77	23,94	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
40	10,31	14,69	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
41	59,62	38,77	-	SIM	-	ALTA	AGRICULTURA
42	21,51	20,52	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
43	30,76	22,49	-	SIM	-	BAIXA	FLORESTA
44	35,03	30,15	-	-	-	ALTA	FLORESTA
45	40,00	31,26	-	-	-	ALTA	FLORESTA

46	42,39	35,29	-	-	-	ALTA	FLORESTA
47	0,86	6,30	SIM	-	-	ALTA	PASTAGEM
48	5,19	11,77	SIM	-	-	MEDIA	FLORESTA
49	69,09	65,76	-	-	-	ALTA	FLORESTA
50	21,28	35,84	-	-	-	ALTA	FLORESTA
51	68,42	52,88	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
52	114,92	49,79	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
53	101,15	61,06	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
54	15,37	20,05	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
55	48,36	34,71	-	-	-	ALTA	FLORESTA
56	38,36	34,15	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
57	22,62	37,40	-	-	-	ALTA	FLORESTA
58	155,65	83,36	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
59	38,87	35,86	SIM	-	-	MEDIA	FLORESTA
60	84,50	38,47	-	-	-	ALTA	FLORESTA
61	329,14	154,53	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
62	95,56	58,20	SIM	-	-	ALTA	DIVERSOS
63	6,08	11,55	-	-	-	ALTA	FLORESTA
64	54,61	48,68	-	-	-	ALTA	FLORESTA
65	28,46	24,83	-	-	-	ALTA	FLORESTA
66	50,92	34,98	-	-	-	ALTA	FLORESTA
67	62,97	85,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
68	97,12	86,28	-	-	-	ALTA	FLORESTA
69	173,05	138,96	SIM	-	-	ALTA	DIVERSOS
70	28,13	40,29	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
71	91,51	57,15	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
72	61,70	49,18	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
73	44,20	40,93	SIM	-	-	ALTA	DIVERSOS
74	260,71	170,79	-	-	-	ALTA	FLORESTA
75	22,71	27,27	SIM	-	-	ALTA	DIVERSOS
76	19,67	21,60	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
77	13,68	19,16	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
78	142,87	75,41	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
79	50,77	60,72	-	-	-	ALTA	FLORESTA
80	31,52	34,89	-	-	-	ALTA	FLORESTA
81	46,91	34,84	-	-	-	ALTA	FLORESTA
82	10,41	12,77	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
83	60,04	62,86	-	-	-	ALTA	FLORESTA
84	22,19	23,74	-	-	-	ALTA	FLORESTA
85	6,35	12,66	-	-	-	ALTA	FLORESTA
86	454,04	291,47	-	-	-	ALTA	FLORESTA
87	32,33	34,99	-	-	-	ALTA	FLORESTA
88	23,40	31,38	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
89	56,31	40,08	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
90	104,09	74,78	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
91	42,63	50,19	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
92	96,97	79,06	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
93	78,89	54,34	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
94	19,25	21,41	-	-	-	ALTA	FLORESTA
95	108,72	90,23	-	-	SIM	ALTA	DIVERSOS

96	28,58	31,18	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
97	58,39	42,53	-	-	-	ALTA	FLORESTA
98	93,98	72,12	-	-	-	ALTA	FLORESTA
99	121,27	55,00	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
100	47,25	46,71	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
101	11,01	13,91	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
102	20,02	18,66	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
103	29,98	23,58	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
104	53,30	40,30	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
105	35,19	28,12	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
106	143,33	70,96	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
107	8,15	12,79	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
108	90,29	47,31	-	-	-	ALTA	FLORESTA
109	41,38	28,51	-	-	-	ALTA	FLORESTA
110	31,10	31,45	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
111	24,21	20,44	-	-	-	ALTA	FLORESTA
112	10,74	12,61	-	-	-	ALTA	FLORESTA
113	30,35	23,14	-	-	-	ALTA	FLORESTA
114	56,50	44,56	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
115	122,00	79,60	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
116	219,30	105,05	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
117	40,27	37,04	-	-	-	ALTA	FLORESTA
118	16,42	16,51	-	-	-	ALTA	FLORESTA
119	13,42	16,92	-	-	-	ALTA	FLORESTA
120	55,02	42,91	-	-	-	ALTA	FLORESTA
121	6,47	11,43	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
122	10,97	13,89	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
123	75,10	49,76	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
124	34,26	25,98	-	-	-	ALTA	FLORESTA
125	61,75	37,12	-	-	-	ALTA	FLORESTA
126	155,17	50,70	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
127	50,49	31,10	-	-	-	ALTA	FLORESTA
128	51,79	32,01	-	-	-	ALTA	FLORESTA
129	153,90	72,01	-	SIM	SIM	ALTA	DIVERSOS
130	20,02	18,42	-	-	-	ALTA	FLORESTA
131	63,85	40,48	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
132	65,38	40,94	-	-	-	ALTA	FLORESTA
133	65,23	34,97	-	-	-	ALTA	FLORESTA
134	95,63	58,58	-	-	-	ALTA	FLORESTA
135	26,65	42,14	-	-	-	ALTA	FLORESTA
136	179,10	127,04	-	-	-	ALTA	FLORESTA
137	21,07	24,20	-	-	-	ALTA	FLORESTA
138	47,27	29,18	SIM	-	SIM	ALTA	FLORESTA
139	12,88	17,55	-	-	-	ALTA	FLORESTA
140	22,77	26,79	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
141	14,53	15,67	-	-	-	ALTA	FLORESTA
142	15,24	30,53	-	-	-	ALTA	FLORESTA
143	19,73	29,86	-	-	-	ALTA	FLORESTA
144	28,56	24,62	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
145	84,05	46,32	-	-	-	ALTA	FLORESTA

146	32,60	25,02	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
147	33,97	24,09	-	-	-	ALTA	FLORESTA
148	19,28	22,49	-	-	-	ALTA	FLORESTA
149	33,08	36,07	-	-	-	ALTA	FLORESTA
150	86,74	62,64	-	-	-	ALTA	FLORESTA
151	57,67	53,33	-	-	-	ALTA	FLORESTA
152	45,53	35,17	-	-	-	ALTA	FLORESTA
153	85,29	51,59	-	-	-	ALTA	FLORESTA
154	21,93	20,98	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
155	72,48	45,60	-	-	-	ALTA	FLORESTA
156	128,51	51,08	-	-	-	ALTA	FLORESTA
157	39,03	30,94	-	-	-	ALTA	FLORESTA
158	37,16	29,48	-	-	-	ALTA	FLORESTA
159	32,19	33,30	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
160	27,74	24,54	SIM	-	SIM	ALTA	FLORESTA
161	53,90	63,90	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
162	7,20	11,18	SIM	-	-	ALTA	ÁGUA
163	32,01	32,92	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
164	54,24	52,00	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
165	25,43	22,74	-	-	-	ALTA	FLORESTA
166	74,07	67,34	-	-	-	ALTA	FLORESTA
167	19,98	18,68	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
168	63,66	33,85	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
169	66,75	34,35	-	-	-	ALTA	FLORESTA
170	32,93	32,96	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
171	20,83	21,55	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
172	35,40	25,63	SIM	-	SIM	ALTA	FLORESTA
173	26,24	25,20	-	-	-	ALTA	FLORESTA
174	25,32	27,17	-	-	-	ALTA	FLORESTA
175	41,51	37,17	-	-	-	ALTA	FLORESTA
176	111,43	63,35	-	-	-	ALTA	FLORESTA
177	48,68	33,86	-	-	-	ALTA	FLORESTA
178	21,01	24,22	-	-	-	ALTA	FLORESTA
179	14,61	21,10	-	-	-	ALTA	FLORESTA
180	50,27	31,15	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
181	37,65	37,38	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
182	37,68	33,50	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
183	18,44	21,95	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
184	15,05	19,63	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
185	40,37	35,05	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
186	109,07	49,59	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
187	250,89	87,50	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
188	29,22	22,20	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
189	13,40	14,29	-	-	-	ALTA	FLORESTA
190	59,36	33,81	-	SIM	-	ALTA	PASTAGEM
191	31,10	24,47	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
192	34,89	25,57	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
193	78,06	47,63	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
194	58,56	43,01	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
195	58,74	43,63	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA

196	14,46	43,43	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
197	26,10	29,48	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
198	34,86	37,70	-		-	ALTA	FLORESTA
199	67,72	50,35	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
200	35,81	23,78	-	SIM	SIM	MEDIA	FLORESTA
201	31,07	25,59	-	-		ALTA	FLORESTA
202	142,72	78,85	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
203	15,01	18,36	-	-	-	ALTA	FLORESTA
204	54,54	41,38	SIM	-	SIM	ALTA	FLORESTA
205	39,34	38,01	-	-	-	ALTA	FLORESTA
206	31,10	46,57	-	-	-	ALTA	FLORESTA
207	16,82	22,23	-	-	-	ALTA	FLORESTA
208	82,37	43,30	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
209	31,91	30,67	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
210	40,19	41,15	-	-	-	ALTA	FLORESTA
211	177,04	72,48	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
212	15,05	22,23	-	-	-	ALTA	FLORESTA
213	11,84	20,93	-	-	-	ALTA	FLORESTA
214	24,58	30,01	-	-	-	ALTA	FLORESTA
215	19,58	22,91	-	-	-	ALTA	FLORESTA
216	32,65	37,04	-	-	-	ALTA	FLORESTA
217	27,53	25,84	-	-	-	ALTA	FLORESTA
218	119,85	60,09	-	-	-	ALTA	FLORESTA
219	127,03	67,44	-	-	-	ALTA	FLORESTA
220	25,91	25,20	-	-	-	ALTA	FLORESTA
221	154,23	68,63	-	-	-	ALTA	FLORESTA
222	21,94	21,79	-		-	ALTA	FLORESTA
223	37,00	37,60	-	-	-	ALTA	FLORESTA
224	25,36	34,13	-	-	-	ALTA	FLORESTA
225	19,84	20,36	-	-	-	ALTA	FLORESTA
226	10,25	15,33	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
227	8,80	14,38	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
228	57,04	46,56	-	-	-	ALTA	FLORESTA
229	26,66	31,11	-	-	-	ALTA	FLORESTA
230	32,80	29,17	-	-	-	ALTA	FLORESTA
231	31,56	30,61	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
232	15,35	19,76	-	-	-	ALTA	FLORESTA
233	46,09	27,61	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
234	51,54	41,16	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
235	18,22	26,06	-		-	ALTA	FLORESTA
236	13,81	15,79	-	-	-	ALTA	FLORESTA
237	31,44	25,18	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
238	115,46	109,95	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
239	23,05	21,22	-	-	-	ALTA	FLORESTA
240	11,08	14,34	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
241	57,77	44,33	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
242	13,92	15,16	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
243	49,05	40,68	SIM		-	BAIXA	FLORESTA
244	12,65	28,50	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
245	31,62	33,47	SIM	-	-	BAIXA	DIVERSOS

246	49,46	33,30	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
247	9,44	18,09	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
248	39,38	26,99	-	-	-	ALTA	FLORESTA
249	7,57	14,32	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
250	9,28	14,55	-	SIM	-	BAIXA	PASTAGEM
251	15,51	19,30	-	-	-	ALTA	FLORESTA
252	28,99	26,39	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
253	19,56	22,78	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
254	12,71	19,58	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
255	50,15	47,52	-	-	-	ALTA	FLORESTA
256	24,14	25,11	-	-	-	ALTA	FLORESTA
257	28,17	20,58	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
258	13,11	17,17	-	-	-	ALTA	FLORESTA
259	17,82	17,62	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
260	15,87	18,62	-	-	-	ALTA	FLORESTA
261	33,74	32,10	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
262	14,51	16,33	-	-	-	BAIXA	FLORESTA
263	27,01	24,57	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
264	14,63	19,05	-	-	-	ALTA	FLORESTA
265	28,72	38,98	-	-	-	ALTA	FLORESTA
266	69,86	97,55	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
267	8,59	17,53	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
268	218,25	175,77	-	-	-	ALTA	FLORESTA
269	31,80	31,15	-	-	-	ALTA	FLORESTA
270	14,69	15,39	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
271	23,38	24,85	-	-	-	ALTA	FLORESTA
272	69,53	93,30	-	-	-	ALTA	FLORESTA
273	26,44	27,34	-	-	-	ALTA	FLORESTA
274	50,70	30,03	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
275	39,96	25,07	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
276	14,48	15,53	-	-	-	ALTA	FLORESTA
277	20,79	17,67	-	-	-	ALTA	FLORESTA
278	11,73	14,87	-	-	-	ALTA	FLORESTA
279	18,19	16,71	-	-	-	BAIXA	FLORESTA
280	107,57	71,48	-	-	-	ALTA	FLORESTA
281	115,91	78,30	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
282	46,90	31,64	-	-	-	ALTA	FLORESTA
283	18,72	21,01	-	-	-	ALTA	FLORESTA
284	22,53	20,83	-	-	-	ALTA	FLORESTA
285	111,11	97,33	-	-	-	ALTA	FLORESTA
286	84,91	96,28	-	-	-	ALTA	FLORESTA
287	92,70	122,14	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
288	191,64	143,14	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
289	8,86	17,41	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
290	294,59	81,23	-	-	SIM	ALTA	AGRICULTURA
291	43,27	48,43	-	-	SIM	ALTA	AGRICULTURA
292	245,51	272,53	-	-	-	ALTA	FLORESTA
293	30,85	31,23	-	SIM	SIM	ALTA	ÁGUA
294	27,60	27,41	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
295	102,04	63,65	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA

296	12,75	18,24	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
297	11,52	14,92	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
298	13,40	18,75	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
299	8,62	12,06	-	-	-	ALTA	FLORESTA
300	222,68	110,85	-	-	-	ALTA	FLORESTA
301	61,49	32,40	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
302	6,12	10,76	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
303	8,73	21,00	-	-	-	ALTA	ÁGUA
304	32,82	37,70	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
305	29,08	29,45	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
306	25,19	29,51	-	-	-	ALTA	FLORESTA
307	13,54	19,63	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
308	26,23	25,32	-	SIM	-	ALTA	ÁGUA
309	101,41	80,77	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
310	6,69	10,83	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
311	1,90	5,50	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
312	33,04	47,97	-	-	-	ALTA	FLORESTA
313	27,39	39,24	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
314	3,31	7,13	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
315	5,65	11,84	-	-	-	ALTA	FLORESTA
316	67,18	79,91	-	-	-	ALTA	FLORESTA
317	18,04	20,67	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
318	14,57	18,45	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
319	19,27	30,21	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
320	7,67	12,15	-	-	-	ALTA	FLORESTA
321	58,65	41,07	-	-	SIM	BAIXA	FLORESTA
322	6,30	9,55	-	-	-	ALTA	FLORESTA
323	41,02	26,00	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
324	11,16	16,67	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
325	40,12	26,63	-	-	-	ALTA	FLORESTA
326	3,42	7,33	-	-	-	ALTA	FLORESTA
327	8,06	11,24	-	-	-	ALTA	FLORESTA
328	113,58	52,03	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
329	8,53	11,74	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
330	4,98	9,12	-	SIM	-	MEDIA	DIVERSOS
331	9,77	12,17	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
332	6,98	11,38	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
333	14,78	19,64	-	-	-	ALTA	FLORESTA
334	17,94	16,58	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
335	57,98	38,85	-	-	-	ALTA	FLORESTA
336	34,01	24,22	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
337	14,53	15,86	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
338	280,57	132,20	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
339	141,57	52,52	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
340	53,67	49,18	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
341	102,66	70,59	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
342	22,56	27,75	-	-	-	ALTA	FLORESTA
343	27,27	25,65	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
344	7,08	14,51	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
345	7,72	13,11	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA

346	13,79	15,04	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
347	70,41	52,26	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
348	61,55	42,81	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
349	9,18	11,63	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
350	30,81	22,12	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
351	5,61	11,12	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
352	29,09	21,35	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
353	24,01	27,40	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
354	28,84	32,59	-	-	-	ALTA	FLORESTA
355	30,28	27,81	-	-	-	ALTA	FLORESTA
356	20,69	17,58	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
357	16,27	17,48	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
358	23,62	18,70	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
359	22,85	19,49	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
360	36,28	32,19	-	-	-	ALTA	FLORESTA
361	78,87	56,67	-	SIM	-	ALTA	DIVERSOS
362	18,99	21,36	-	-	-	ALTA	FLORESTA
363	20,68	21,18	-	-	-	ALTA	FLORESTA
364	13,79	14,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
365	56,10	37,11	-	-	-	ALTA	FLORESTA
366	14,10	18,58	-	-	-	ALTA	FLORESTA
367	117,83	65,93	-	-	SIM	ALTA	PASTAGEM
368	8,00	14,63	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
369	27,00	27,94	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
370	27,23	23,38	-	SIM	SIM	ALTA	AGRICULTURA
371	20,88	20,28	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
372	37,74	30,23	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
373	177,86	68,40	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
374	158,51	67,54	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
375	17,59	20,41	-	-	-	ALTA	FLORESTA
376	26,98	36,92	-	-	-	ALTA	FLORESTA
377	58,02	37,02	-	-	-	ALTA	ÁREA URBANA
378	9,65	18,40	-	-	-	ALTA	ÁREA URBANA
379	23,24	23,75	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
380	169,70	57,26	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
381	15,12	16,76	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
382	93,12	69,35	-	-	-	ALTA	FLORESTA
383	122,35	45,16	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
384	83,95	48,28	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
385	45,00	30,97	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
386	12,79	14,32	-	SIM	-	ALTA	DIVERSOS
387	175,29	77,20	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
388	6,41	10,51	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
389	7,00	11,25	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
390	7,96	11,02	-	-	-	ALTA	FLORESTA
391	39,39	24,19	-	-	-	BAIXA	FLORESTA
392	29,22	37,78	-	-	-	ALTA	FLORESTA
393	41,09	34,41	-	SIM	-	MEDIA	FLORESTA
394	60,25	30,37	-	SIM	-	MEDIA	AGRICULTURA
395	17,35	18,61	-	-	-	ALTA	FLORESTA

396	41,48	26,12	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
397	11,38	14,04	-	-	-	ALTA	FLORESTA
398	74,99	126,09	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
399	60,83	61,85	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
400	20,63	22,17		-	-	MEDIA	DIVERSOS
401	31,76	25,92	SIM	-	-	MEDIA	FLORESTA
402	45,07	32,46	-	-	-	ALTA	FLORESTA
403	65,66	32,39	-	-	-	BAIXA	FLORESTA
404	13,11	16,29	-	-	-	ALTA	FLORESTA
405	64,05	46,50	-	-	-	ALTA	FLORESTA
406	63,18	61,52	-	-	-	ALTA	FLORESTA
407	55,25	36,42	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
408	61,99	61,99	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
409	26,60	21,76	SIM	-	SIM	BAIXA	FLORESTA
410	14,90	15,56	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
411	10,81	13,02	-	-	SIM	MEDIA	FLORESTA
412	38,08	27,77	-	-	-	ALTA	FLORESTA
413	43,11	26,56	-	-	-	ALTA	FLORESTA
414	40,84	30,44	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
415	54,79	34,41	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
416	3,88	7,63	-	-	-	ALTA	FLORESTA
417	11,43	14,18	-	-	-	ALTA	FLORESTA
418	119,01	53,67	-	SIM	SIM	ALTA	DIVERSOS
419	49,57	49,86	-	SIM	-	ALTA	DIVERSOS
420	29,44	35,74	-	SIM	-	ALTA	AGRICULTURA
421	34,29	30,23	-		-	ALTA	FLORESTA
422	5,81	14,76	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
423	5,21	9,17	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
424	12,52	13,74	-	-	-	ALTA	FLORESTA
425	170,06	105,90	-	-	-	ALTA	FLORESTA
426	37,43	36,49	-	-	-	ALTA	FLORESTA
427	96,56	58,95	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
428	28,66	33,50	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
429	22,11	18,95		-	-	ALTA	FLORESTA
430	27,91	23,52	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
431	83,66	70,13	SIM	-	-	ALTA	DIVERSOS
432	12,77	15,68	-	SIM	SIM	ALTA	FLORESTA
433	22,67	24,84	SIM	-	SIM	ALTA	FLORESTA
434	12,25	18,17	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
435	15,13	15,71	-	-	-	ALTA	FLORESTA
436	36,35	37,48	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
437	18,81	21,37	-	-	-	ALTA	FLORESTA
438	24,99	23,00	-		-	ALTA	AGRICULTURA
439	37,25	31,70	-	SIM	SIM	ALTA	DIVERSOS
440	30,58	25,33	-	SIM	SIM	ALTA	DIVERSOS
441	57,64	54,46	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
442	21,22	20,18	-	-	-	ALTA	FLORESTA
443	32,99	26,35	-	-	-	ALTA	FLORESTA
444	19,65	17,65	-	-	-	ALTA	FLORESTA
445	20,95	22,02	-	-	-	ALTA	FLORESTA

446	498,32	91,85	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
447	36,81	36,32	-	-	-	ALTA	FLORESTA
448	16,30	15,97	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
449	39,07	24,29	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
450	55,87	29,96	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
451	38,44	38,25	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
452	20,95	23,42	-	-	-	ALTA	FLORESTA
453	10,47	16,11	-	-	-	ALTA	FLORESTA
454	16,28	22,06	-	-	-	ALTA	FLORESTA
455	21,25	23,33	-	-	-	ALTA	FLORESTA
456	83,79	38,30	-	-	-	ALTA	FLORESTA
457	69,28	42,68	-	-	-	ALTA	FLORESTA
458	86,97	49,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
459	41,15	31,55	-	-	-	ALTA	FLORESTA
460	10,22	14,94	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
461	13,87	17,36	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
462	25,19	25,35	-	-	-	ALTA	FLORESTA
463	35,21	44,81	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
464	204,53	78,91	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
465	298,41	94,38	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
466	20,35	29,03	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
467	40,76	28,64	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
468	50,89	37,54	-	-	-	ALTA	FLORESTA
469	223,80	179,79	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
470	74,63	67,17	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
471	64,12	37,20	-	-	-	ALTA	FLORESTA
472	59,42	42,40	SIM	-	-	ALTA	FLORESTA
473	28,31	30,92	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
474	16,94	18,93	-	-	-	ALTA	FLORESTA
475	30,24	24,29	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
476	109,62	57,25	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
477	66,03	37,16	-	-	-	ALTA	FLORESTA
478	30,80	34,71	-	-	-	ALTA	FLORESTA
479	52,84	41,16	-	-	SIM	ALTA	FLORESTA
480	21,55	19,76	-	-	-	ALTA	FLORESTA
481	129,55	66,79	-	-	SIM	ALTA	AGRICULTURA
482	7,65	10,64	-	-	-	ALTA	FLORESTA
483	65,09	38,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
484	31,43	23,64	-	-	-	ALTA	FLORESTA
485	116,88	89,76	-	-	-	ALTA	FLORESTA
486	20,98	20,95	-	-	-	ALTA	FLORESTA
487	46,86	41,84	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
488	14,88	15,98	-	-	-	ALTA	FLORESTA
489	89,44	46,25	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
490	41,39	30,46	-	SIM	-	ALTA	FLORESTA
491	31,05	21,35	-	-	-	MEDIA	DIVERSOS
492	28,99	25,67	-	-	-	ALTA	FLORESTA
493	21,93	18,79	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
494	8,00	13,08	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
495	33,10	30,99	-	-	-	ALTA	FLORESTA

496	10,44	14,00	-	-	-	ALTA	FLORESTA
497	39,45	30,46	-	-	-	ALTA	FLORESTA
498	29,28	23,36	-	-	-	ALTA	FLORESTA
499	348,97	102,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
500	35,85	25,36	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
501	32,35	22,92	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
502	48,11	48,51	-	-	-	ALTA	FLORESTA
503	30,73	26,45	-	-	-	ALTA	PASTAGEM
504	55,33	53,31	-	-	-	ALTA	FLORESTA
505	11,83	16,12	-	-	-	ALTA	FLORESTA
506	49,01	32,97	-	-	-	ALTA	FLORESTA
507	40,19	34,30	-	-	-	ALTA	FLORESTA
508	29,66	31,82	-	-	-	ALTA	FLORESTA
509	57,88	43,68	-	-	-	ALTA	FLORESTA
510	6,91	10,32	-	-	-	ALTA	AGRICULTURA
511	11,28	19,49	-	-	-	ALTA	FLORESTA
512	30,07	25,44	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
513	19,83	19,38	-	-	-	ALTA	FLORESTA
514	71,16	60,00	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
515	42,84	28,14	-	-	-	ALTA	FLORESTA
516	55,28	40,38	-	-	-	ALTA	DIVERSOS
517	64,04	53,97	-	-	-	ALTA	FLORESTA
518	55,23	32,69	-	-	-	ALTA	FLORESTA
519	58,83	33,49	-	-	-	MEDIA	FLORESTA
520	59,94	50,82	-	-	-	ALTA	FLORESTA
521	22,97	27,47	-	-	-	ALTA	FLORESTA
522	33,33	23,23	-	-	-	ALTA	FLORESTA
523	20,72	19,23	-	-	-	ALTA	FLORESTA
524	23,54	22,81	-	-	-	ALTA	FLORESTA
525	26,28	27,08	-	-	-	ALTA	FLORESTA
526	29,66	38,56	-	-	-	ALTA	FLORESTA
527	99,95	53,25	-	-	-	ALTA	FLORESTA
528	62,82	43,87	-	-	-	MEDIA	FLORESTA

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cais Mauá C6**. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiZTRjZDlmYjgtNzAzMS00ZTFmLTlmZDAtNzEwNjM0MDU0NTJhliwidCI6ImUwYml0MDEyLTgxMGltNDY5YS04YjRkLTY2N2ZjZDFiYWY4OCJ9>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- ASEVEDO, Lorena Abreu. **Condicionantes naturais dos movimentos de massa em São Pedro da Serra, Nova Friburgo, RJ: Um estudo de caso da bacia do rio São Pedro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682:2009**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 2, p. 273-302, dez. 2017.
- BITAR, O. Y. (coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações-1: 25.000**: nota técnica explicativa. São Paulo: IPT; Brasília: CPRM, 2014.
- BITTENCOURT, L. F. F.; BATISTA, G. T.; CATELANI, C. S. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ocupação de solo de mata ciliar do rio Paraíba do Sul no município de Caçapava**. In: SEMINÁRIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO DO VALE DO PARAÍBA, 1, 2006, Taubaté. **Anais [...]** Taubaté: UNITAU, 2006. p. 89-99.
- BORSATTO, S. *et al.* Mapeamento geológico da área urbana de Caxias do Sul como etapa da cartografia geotécnica. **Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 83-92. 2015.
- BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). *Diário Oficial da União*, Brasília, 11 abr. 2012.
- BRESSANI L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F. Desenvolvimento de estudos de engenharia geotécnica/geologia com vistas à geração de relatório e mapa geotécnico dos solos e rochas superficiais da área urbana da cidade de Caxias do Sul. Relatório final. Caxias do Sul: Prefeitura Municipal, 2005.
- CAETANO, Robert. **Mapa de Uso e Ocupação do Solo de Ribeirão Preto (2020)**. 2022. Disponível em: <https://www.spatialnode.net/projects/mapa-de-uso-e-ocupacao-do-solo-56063e>. Acesso em: 6 fev. 2025.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos de geoprocessamento. In: ASSAD, E.; SANO, E. E. (org.). **Sistemas de Informações Geográficas**: aplicações na agricultura. Brasília, DF: EMBRAPA, 1998. p. 3-11.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1973.

CARDOZO, G. L. *et al.* Inventário de movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Mascarada/RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, UFSM, v. 43, n. 31, p. 1-26, abr. 2021.

CARMINATO, L. P.; LEITE, G. T. D.; PAMBOUKIAN, S. V. D. **Utilização de imagens de sensoriamento remoto em projetos de geoprocessamento**. São Paulo: [S.l.], 2014.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (orgs.). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.

CAXIAS DO SUL. Prefeitura Municipal. **Confira imagens de Caxias do Sul após as fortes chuvas**. 2024. Disponível em: <https://caxias.rs.gov.br/noticias/2024/05/mmm>. Acesso em: 15 dez. 2024.

CAXIAS DO SUL. Prefeitura Municipal. **Parecer técnico**. Caxias do Sul: SMAPA, 2022. Disponível em: <https://gcpstorage.caxias.rs.gov.br/documents/2022/05/df6ce6d4-746c-4580-a9c6-87bad2d7259b.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2024.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: Caxias do Sul – RS**. 2017. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18173>. Acesso em: 4 fev. 2025.

DEFESA CIVIL. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. **Boletins sobre o impacto das chuvas no RS**. 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-20-8>. Acesso em: 26 out. 2024.

DIAS, E. S. **Análise do mapa de suscetibilidade versus impactos reais da enxurrada de 2020 em Presidente Getúlio/SC**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Embrapa Territorial. **Satélites de monitoramento**. Campinas: EMBRAPA, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>. Acesso em: 18 jan. 2025.

ENGESAT. **Sentinel-2**. 2025. Disponível em: <https://www.engesat.com.br/sentinel-2/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

G1. **Rolamento de pedra deixa mais de 100 famílias desabrigadas no ES**. G1, Espírito Santo, jan. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2016/01/rolamento-de-pedra-deixa-mais-de-100-familias-desabrigadas-no-es.html>. Acesso em: 01 fev. 2025.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GERSCOVICH, D. M. S.; VARGAS JÚNIOR, E. A.; CAMPOS, T. M. P. Estabilidade de talude. *In*: CARVALHO, J. C. *et al.* (orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 613-632.

GONÇALVES, Y. D. C. **Estudo de movimento de massa do tipo rastejo (creeping) no Morro do Benjamin, em São José - SC**. 2014. 72 f. Monografia (Bacharel em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Blucher, 1976.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O manual de deslizamento**: um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston, Virgínia: U.S. Geological Survey, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama de cidades**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panorama>. Acesso em: 14 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Áreas de risco no Brasil**. 2010. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d4743b1a7387a2f8ede699273970d77.pdf. Acesso em: 05 fev. 2025.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS; CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA. **Nota técnica conjunta IGEO/CEPSRM - 04/2024**: Mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa decorrentes do acumulado de chuva no RS entre 27/04 e 13/05 de 2024. Porto Alegre: UFRGS, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil 1991-2020**. Brasília: INMET, 2022.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Sinais da ocorrência de movimentos de massa**: escorregamento translacional, escorregamento rotacional e fluxo de detritos. Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2024. (Nota técnica).

LANA, J. C. Importância da validação em campo no processo de elaboração das Cartas de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA AMBIENTAL, 15, 2015, Bento Gonçalves. **Anais** [...] Bento Gonçalves: [S.l.], 2015. p. 1-11.

LANA, J. C.; MONTANDON, L. F. Influência da pluviosidade na deflagração de movimentos de massa na região Sul Fluminense. **Revista Técnico-Científica CREA-PR**, jul. 2018. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/392>. Acesso em: 29 jun. 2025.

LEAL, J. M.; AQUINO, C. M. S.; SILVA, F. J. L. T. Uso do mapa de declividade e do modelo digital de elevação na análise do relevo do município de São Miguel do Tapuío – Piauí. **Revista do REGNE**, [S./], v. 5, n. 2, p. 1-15, out. 2019. Disponível em: <http://www.periodicos.ufrn.br/revistadoregne>. Acesso em: 18 jan. 2025.

LOBI. **Estrada da Graciosa**. 2022. Disponível em: <https://lobi.com.br/estrada-da-graciosa/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MAPBIOMAS. **Coleções – MapBiomas Brasil: dados de uso e cobertura da terra – Rio Grande do Sul**. [Rio de Janeiro]: MapBiomas, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 24 jun. 2025.

MAURANO, L. E. P.; ESCADA, M. I. S.; RENNO, C. D. Padrões espaciais de desmatamento ea estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. **Ciência florestal**, v. 29, n. 4, p. 1763-1775, 2019.

NAMIKAWA, L. M. *et al.* Metodologia da produção do mapa de inundações e movimentos de massa do desastre do RS em maio de 2024. São José dos Campos: INPE, 2024.

NASA. **Remote Sensing**. 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/subject/6891/remote-sensing/>. Acesso em: 6 fev. 2025.

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. OpenStreetMap. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

PEREIRA, R. S. **Análise da precipitação e detecção de extremos climáticos na região Sul do Brasil**. 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

PETRUCCI, E.; AZEVEDO, L. M. de. Análise dos eventos extremos de precipitação máxima no município de Cachoeira do Sul/RS, de 1987 a 2020. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 40, n. 3, p. 45-67, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/253447>. Acesso em: 6 fev. 2025.

PINTO, E. J. A. *et al.* **Atlas pluviométrico do Brasil**. Belo Horizonte: CPRM, 2013.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. **Caderno de Geografia**, v. 25, n. 43, p. 116-143, 2015.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. [S./]: Blucher, 2018.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1995.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiás, v. 36, n. 2, p. 285-305, maio/ago. 2016.

ROCHA, L. P. *et al.* Risco Geológico: Uma Abordagem Integrada entre Métodos de Mapeamento Geotécnico Analisados em Nova Friburgo, RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 44, p. 50-65. 2021. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/37686>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M. Análise do evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024. **Journal Health NPEPS**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 1-9, jan./jun. 2024.

RODRIGUES, J.; TUPINAMBÁ, M.; AMARAL, C. **A corrida de massa do Rio Vieira em Teresópolis, Sudeste do Brasil: caracterização da área-fonte dos sedimentos transportados**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, v. 35, n. 2, p. 152-164, mar. 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_152_164. Acesso em: 04 fev. 2025.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SAMIA, J. *et al.* *Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory*. **Landslides**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 547-558, jul. 2016.

SANTOS, A. B.; PETRONZIO, J. A. C. **Mapeamento de uso e ocupação do solo do município de Uberlândia-MG utilizando técnicas de Geoprocessamento**. 2011. Disponível em: <https://marte.sid.inpe.br/attachment.cgi/dpi.inpe.br/marte/2011/07.28.18.42/doc/p0210.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2024.

SANTOS, D. A. C. **Análise espaço-temporal das ocorrências de deslizamentos de terra registradas, entre jan/2009 a dez/2013, na área do “miolo” da cidade de Salvador**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Salvador, 2014.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO RURAL. **Atlas climatológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SAR, 2020. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202005/13110034-atlas-climatico-rs.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SILVA DE PAULA, D. *et al.* **Mapeamento preliminar dos movimentos de massa no estado do Rio Grande do Sul: apoio ao corpo de bombeiros durante o desastre de maio de 2024**. Porto Alegre: INPE, 2024.

SILVA, M. A.; LACERDA, C. S. dos A. **Correção atmosférica em imagens do satélite Sentinel-2 utilizando o processador Sen2Cor**. Artigo – IFMG, Pouso Alegre, 2020.

SILVA, M. G. C. **Análise por sensoriamento remoto de danos causados por evento climático extremo em mangues do município de Iguape (SP), Brasil**. 2023. 34 f. Monografia (Bacharel em Geografia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

- SILVA, M. K. A.; BRITO, J. L. S.; ROSA, R. Mapeamento do uso do solo no município de Pedrinópolis - MG. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, Goiânia. **Anais** [...] Goiânia: INPE, 2005. p. 285-291.
- SOARES, F. R.; PIROLI, E. L. A. A aplicação de geotecnologias no estudo de bacias hidrográficas: ênfase nos atributos geomorfológicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 12, n. 5, p. 1590-1605. 2019.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, [S.l.], v. 38, n. 6, p. 913-920, dec. 1957. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/tr038i006p00913>.
- TEAM, C. W.; LEE, H.; ROMERO, J. (eds.). **Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Geneva: Switzerland, 2023.
- TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. **Introdução ao QGIS-OSGeo4W-3.30. 1**. São Paulo: Oficina de Textos, 2024.
- URBANIZADORA MUNICIPAL DE CURITIBA. **Aterro Sanitário de Curitiba**. 2024. Disponível em: https://www.urbam.com.br/aterro_sanitario. Acesso em: 11 jan. 2025.
- VAEZA, R. F. *et al.* Uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução. **Floresta e Ambiente**, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 23-29, jan./jun. 2010.
- VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **Landslides: analysis and control**, 1978.
- VERGANI, R. S. **Riscos que a fruticultura enfrenta com o clima e estratégias de enfrentamento para agricultores familiares na região de Caxias do Sul**. 2021. 36 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. ISBN 9788522106370.